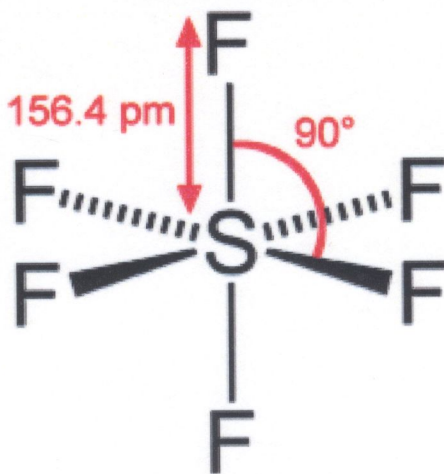


621.315(075)

Л47

В. О. Леонтьев, С. В. Бевз, В. А. Видмиш

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

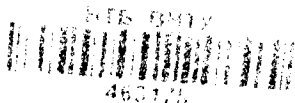


Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

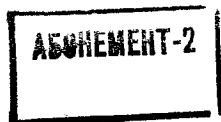
В. О. Леонтєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник



021315(076) 347



Вінниця
ВНТУ
2013

УДК 621.315.5

ББК 31.23я73

Л47

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 25.04.2013 р.).

Рецензенти:

В. В. Назаров, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

В. С. Собчук, кандидат технічних наук, доцент

Леонтьєв, В. О.

Л47 Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонтьєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.

У навчальному посібнику розглядаються основи фізичних явищ в діелектричних, напівпровідникових і магнітних матеріалах. Приводиться класифікація матеріалів і їх електричні, фізико-хімічні та механічні властивості. Розглядаються питання виготовлення матеріалів і області їх застосування. Посібник розроблений відповідно до плану кафедри та програм дисциплін "Електротехнічні матеріали" та "Електроматеріалознавство".

УДК 621.315.5

ББК 31.23я73

463175

НТБ ВНТУ
м. Вінниця

© В. Леонтьєв, С. Бевз, В. Видмиш, 2013

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ РЕЧОВИНИ.....	9
1.1 Види зв'язку.....	9
1.2 Класифікація речовин за електричними властивостями.....	12
1.3 Класифікація речовин за магнітними властивостями.....	14
1.4 Контрольні питання.....	15
2 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	16
2.1 Діелектрик в електричному полі.....	16
2.2 Поляризація діелектриків і діелектрична проникність.....	16
2.2.1 Діелектрична проникність газів.....	19
2.2.2 Діелектрична проникність рідких діелектриків.....	20
2.2.3 Діелектрична проникність твердих діелектриків.....	21
2.3 Основні види поляризації діелектриків.....	23
2.4 Контрольні питання.....	25
3 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	26
3.1 Основні поняття.....	26
3.2 Електропровідність газів.....	29
3.3 Електропровідність рідин.....	30
3.4 Електропровідність твердих діелектриків.....	32
3.5 Контрольні питання.....	36
4 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ.....	37
4.1 Основні поняття.....	37
4.2 Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах.....	40
4.3 Діелектричні втрати в газах.....	41
4.4 Діелектричні втрати в рідких діелектриках.....	42
4.5 Діелектричні втрати в твердих діелектриках.....	44
4.6 Контрольні питання.....	47
5 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	48
5.1 Пробій газів.....	48
5.2 Пробій рідких діелектриків.....	52
5.3 Пробій твердих діелектриків.....	53
5.4 Контрольні питання.....	60
6 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	61
6.1 Вологісні властивості діелектриків.....	61
6.2 Основні механічні властивості діелектриків.....	65
6.3 Теплові властивості діелектриків.....	67
6.4 Контрольні питання.....	70
7 НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.....	71
7.1 Електропровідність напівпровідників.....	71

7.1.1 Власний напівпровідник.....	71
7.1.2 Домішкові напівпровідники.....	73
7.2 Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідників.....	75
7.2.1 Вплив теплової енергії.....	75
7.3 Вплив світла на електропровідність напівпровідників.....	79
7.4 Вплив сильних електричних полів.....	80
7.5 Елементи з властивостями напівпровідників.....	81
7.6 Напівпровідникові хімічні сполуки і матеріали на їх основі.....	82
7.7 Контрольні питання.....	86
8 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.....	87
8.1 Класифікація та основні властивості провідникових матеріалів.....	87
8.1.1 Електропровідність металів.....	88
8.1.2 Властивості провідникових матеріалів.....	89
8.2 Матеріали високої провідності.....	91
8.3 Надпровідники і кріопровідники.....	95
8.4 Сплави високого опору.....	97
8.5 Контрольні питання.....	100
9 МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ.....	102
9.1 Загальні відомості про магнітні властивості матеріалів.....	102
9.2 Магнітом'які матеріали.....	104
9.3 Магнітотверді матеріали.....	109
9.4 Матеріали спеціального призначення.....	113
9.5 Контрольні питання.....	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	119
СЛОВНИК НАЙВЖИВАНШИХ ТЕРМІНІВ.....	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- α_1 – температурний коефіцієнт лінійного розширення;
 γ – питома провідність;
 γ_s – питома поверхнева провідність;
 γ_T – теплопровідність;
 δ – кут діелектричних втрат;
 ϵ – діелектрична проникність;
 η – динамічна в'язкість;
 λ – довжина вільного пробігу частинки, довжина електромагнітної хвилі;
 μ – дипольний момент молекули, магнітна проникність, коефіцієнт ослаблення випромінювання;
 ν – молярна концентрація, кінематична в'язкість, коефіцієнт пружного зв'язку;
 ρ – щільність, питомий (об'ємний) опір;
 ρ_s – питомий поверхневий опір;
 ρ_T – питомий тепловий опір;
 σ – поверхнева щільність заряду, механічна міцність;
 τ – час;
 φ – відносна вологість повітря, кут;
 ψ – вологість матеріалу;
 ω – кутова частота;
 B – магнітна індукція;
 C – сміність конденсатора, теплоємність;
 c – швидкість світла, питома теплоємність;
 D – електрична індукція;
 d – діаметр;
 E – напруженість електричного поля, модуль пружності;
 $E_{\text{вр}}$ – електрична міцність;
 e – заряд електрона, основа натуральних логарифмів;
 F – сила;
 f – частота;
 g – прискорення сили тяжіння;
 H – постійна Планка;
 h – висота, товщина, довжина;
 I – сила струму;
 j – миттєвий струм;
 J – щільність струму;
 k – постійна Больцмана;
 l – довжина;
 M – молекулярна маса, момент сили;

m – маса;
 N – число Авогадро, концентрація домішок;
 n – показник заломлення;
 n_0 – число частинок в одиниці об'єму, концентрація носіїв;
 P – потужність;
 p – тиск, питомі втрати потужності;
 p_0 – концентрація дірок;
 Q – заряд конденсатора, добротність;
 q – заряд;
 R – газова постійна;
 r – радіус, опір;
 S – площа поверхні;
 T – абсолютна температура, твердість;
 TK_ϵ або α_ϵ – температурний коефіцієнт діелектричної проникності;
 TK_ρ або α_ρ – температурний коефіцієнт питомого опору;
 t – температура, °C;
 U – різниця потенціалів;
 u – рухливість носіїв;
 v – швидкість;
 V – об'єм;
 W – енергія;
 w – енергія активації, ширина забороненої зони;
 Z – номер елемента в таблиці Менделєєва;
 z – повний опір змінного струму.

ВСТУП

Стабільний розвиток економіки держави значною мірою залежить від надійного функціонування систем енергозабезпечення. Сучасна електроенергетика використовує в елементах конструкцій надзвичайно широкий спектр різноманітних електротехнічних матеріалів (ЕТМ), від механічних, фізико-хімічних та інших властивостей яких значною мірою залежить надійність роботи електроенергетичного обладнання. Тому актуальним завданням забезпечення систем електроспоживання якісним обладнанням є розробка і впровадження нових, більш якісних матеріалів з кращими функціональними та експлуатаційними характеристиками.

При проектуванні та розробці нових електротехнічних приладів і обладнання з покращеними характеристиками знання електрофізичних, фізико-технічних та механічних властивостей використовуваних матеріалів є обов'язковою умовою раціонального вирішення цього завдання. Забезпечення високої надійності роботи електроенергетичного обладнання базується, насамперед, на чітких уявленнях про процеси, що відбуваються в матеріалах протягом їх експлуатації, знаннях про методи профілактичного контролю та випробування електротехнічних виробів на їх основі, вимогах чинних ДСТУ, нормативних і технічних умовах їх використання. Це є гарантом надійної роботи електричних мереж і всього комплексу енергетичного обладнання: генераторів, трансформаторів, комутаційних апаратів, компенсуювальних пристроїв тощо, в конструкції яких використовують ЕТМ. Вони знаходяться під впливом різноманітних зовнішніх факторів, у тому числі сильних електромагнітних полів, високих температур, статичних і динамічних навантажень, атмосферних впливів. Знання умов забезпечення стабільності параметрів цих матеріалів під дією вказаних факторів є важливим для забезпечення безперебійного функціонування електрообладнання і всієї електроенергетичної системи в цілому.

Розробка нових матеріалів, необхідних для вирішення тієї чи іншої електротехнічної задачі, й безперервне вдосконалювання уже відомих матеріалів йшли одночасно з загальним розвитком електротехніки і розширенням вимог електропромисловості до якості матеріалів.

Швидке зростання електропромисловості у її численних галузях супроводжується безперервним збільшенням номенклатури застосовуваних матеріалів і удосконалюванням технології їх виготовлення з вітчизняної сировини.

Матеріал – це об'єкт з певним складом, структурою, властивостями, призначений для виконання певних функцій. Матеріали можуть мати різні агрегатні стани: тверді, рідкі, газоподібні або плазмові.

Матеріалознавство – наука, що займається вивченням складу,

структури, властивостей матеріалів, поведінки матеріалів при різних впливах: теплових, електричних, магнітних та інших, а також при комбінації цих впливів.

ЕТМ – це розділ матеріалознавства, який займається матеріалами для електроенергетики, що мають специфічні властивості, необхідні для конструювання, виробництва та експлуатації електротехнічного устаткування.

Дисципліна «Електротехнічні матеріали» є нормативною для всіх електротехнічних спеціальностей, оскільки в ній комплексно розглядаються властивості матеріалів, у тому числі в реальних умовах експлуатації електроенергетичного обладнання, базується на таких фундаментальних науках, як фізика, хімія, теоретичні основи електротехніки та створює основу для вивчення багатьох профільних дисциплін електротехнічних спеціальностей.

З метою глибшого вивчення та комплексного розуміння електричних і магнітних властивостей, механічної міцності, старіння матеріалів і інших особливостей при використанні їх в енергетичному обладнанні і підготовлений даний навчальний посібник.

В навчальному посібнику приділяється увага основам фізичних явищ в діелектричних, напівпровідникових і магнітних матеріалах. Наводиться класифікація матеріалів і їх електричні, фізико-хімічні та механічні властивості. Розглядаються питання виготовлення матеріалів і їх застосування в електроенергетичних установках.

Даний навчальний посібник призначений для студентів електротехнічних спеціальностей та рекомендований для використання при вивченні дисциплін «Електротехнічні матеріали» та «Електроматеріалознавство», складається з дев'яти розділів.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ РЕЧОВИНИ

1.1 Види зв'язку

В залежності від будови зовнішніх електронних оболонок атомів можуть утворюватися різні види зв'язку.

Ковалентним називається зв'язок атомів один з одним, що досягається за рахунок електронів, які стають загальними, як це схематично показано для двохатомної молекули на рис. 1.1. Ковалентний зв'язок спостерігається в молекулах, утворених металоїдними атомами, наприклад у молекулі хлору та ін.

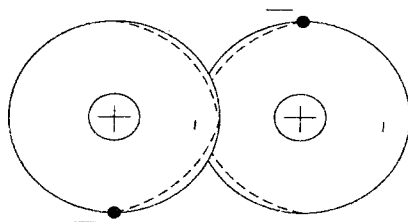


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення двохатомної молекули з ковалентним зв'язком

Молекули, у яких центри додатних і від'ємних зарядів збігаються, є нейтральними. Якщо ж в окремих молекулах центри протилежних за знаком зарядів не збігаються і знаходяться на деякій відстані один від одного, то такі молекули називаються полярними або дипольними.

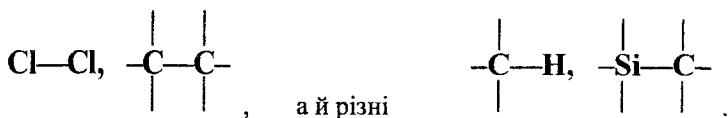
Полярна молекула характеризується величиною дипольного моменту, що визначається добутком заряду і відстані між центрами додатного і від'ємного зарядів.

При розгляді будови полярних і неполярних молекул часто виходять з того, що на ці молекули не діють зовні електричні сили. Але вплив електричних сил може суттєво змінити внутрішню структуру молекул і її властивості.

Зокрема, під дією зовнішнього електричного поля молекули, які самі по собі були неполярними, стають полярними. Якщо неполярну молекулу помістити між пластинами конденсатора, то заряди пластин будуть впливати на розподіл заряду всередині молекули. Додатно заряджені ядра будуть притягуватись до від'ємного заряду пластин, а від'ємно заряджені електрони – до додатних пластин. В результаті відбудеться зміщення електронів відносно ядер. Якщо раніше центри тяжіння додатних і від'ємних зарядів збігались, то під дією електричного поля вони

розійдуться, і молекула стане дипольною. Утворені диполі називаються наведеними або індукованими. При знятті зовнішнього електричного поля дипольний момент зникає, молекула знову стає неполярною.

Ковалентний зв'язок може бути як у молекулах (у трьох агрегатних станах речовини), так і між атомами, що утворюють ґратки кристала. Прикладами таких кристалів є алмаз, кремній, германій. Ковалентним зв'язком можуть утримуватися не тільки однакові атоми:



Іонний зв'язок визначається силами притягання між додатними і від'ємними іонами. Тверді тіла іонної структури характеризуються підвищеною механічною міцністю та достатньо високою температурою плавлення. Типовими прикладами іонних кристалів є галоїдні солі лужних металів.

На рис. 1.2 показані структури хлористого натрію і хлористого цезію. З рисунка видно щільне упакування іонів першої речовини і нещільне – другої:

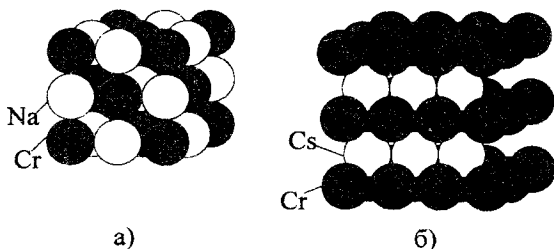


Рисунок 1.2 – Структура і щільне упакування іонів хлористого натрію (а) і структура і нещільне упакування іонів хлористого цезію (б)

Металевий зв'язок веде також до утворення твердих кристалічних тіл. Метали можна розглядати як системи, побудовані з розташованих у вузлах ґраток додатно заряджених атомних остовів, що знаходяться в середовищі вільних електронів (рис. 1.3).

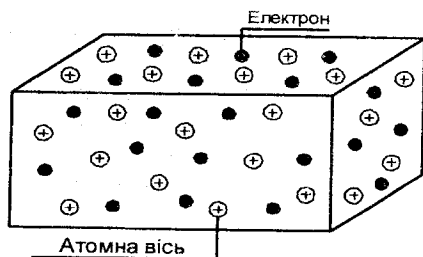


Рисунок 1.3 – Схема будови металевого провідника

Притягання між додатними атомними остовами й електронами є причиною монолітності металу. Наявність вільних електронів веде до високої електропровідності і теплопровідності металу, а також є причиною його блиску. Ковкість металу пояснюється переміщенням і ковзанням окремих шарів атомних остовів.

Молекулярний зв'язок (зв'язок Ван-дер-Ваальса). Такий зв'язок існує в ряді речовин між молекулами з ковалентними внутрішніми молекулярними зв'язками. Міжмолекулярне притягання в цьому випадку обумовлюється погодженим рухом валентних електронів у сусідніх молекулах (рис. 1.4). У будь-який момент часу електрони максимально віддалені один від одного і максимально наближені до додатних зарядів.

При цьому сили притягання валентних електронів додатно заряджених остовів сусідніх молекул виявляються сильніші сил взаємного відштовхування електронів зовнішніх орбіт. Зв'язок Ван-дер-Ваальса спостерігається між молекулами деяких речовин, наприклад парафіну, що має низьку температуру плавлення і свідчить про неміцність його кристалічної молекулярної ґратки.

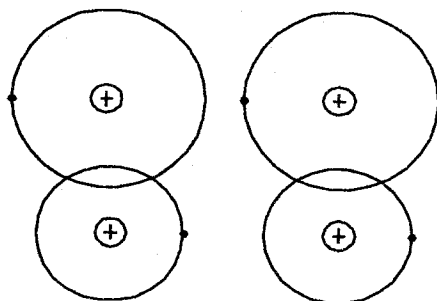


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення двох взаємодійних молекул (зв'язок Ван-дер-Ваальса)

1.2 Класифікація речовин за електричними властивостями

Дослідження спектрів випромінювання різних речовин у газоподібному стані, коли атоми розташовані один від другого на великих відстанях, показує, що для атомів кожної речовини характерні цілком визначені спектральні лінії. Це говорить про наявність енергетичних станів (рівнів) для різних атомів.

Частина цих рівнів заповнена електронами в нормальному (незбудженому) стані атома, на інших енергетичних рівнях електрони можуть знаходитися тільки після того, як атом піддається зовнішньому енергетичному впливові і стане збудженим. Прагнучи перейти до стійкого стану, атом випромінює надлишок енергії в момент повернення електронів на рівні, на яких енергія атома мінімальна (рис. 1.5).

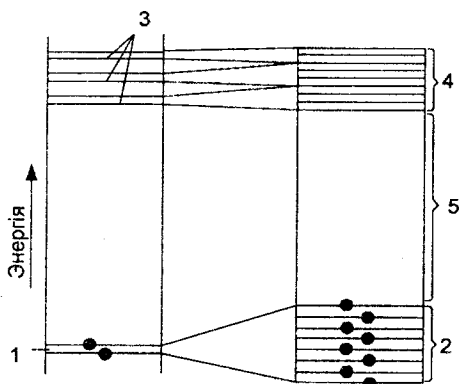


Рисунок 1.5 – Схема розташування енергетичних рівнів відокремленого атома (ліворуч) і неметалевого твердого тіла (праворуч) (1 – нормальний енергетичний рівень атома, 2 – заповнена електронами зона, 3 – рівні збудженого стану атома, 4 – вільна зона, 5 – заборонена зона)

При переході газоподібної речовини в рідину, а потім при утворенні кристалічних ґраток твердого тіла, всі наявні в даному типі атомів електронні рівні (як заповнені електронами, так і незаповнені) трохи зміщуються внаслідок дії сусідніх атомів один на одного. Таким чином, з окремих енергетичних рівнів відокремлених атомів у твердому тілі утворюється ціла смуга – зона енергетичних рівнів.

На рис. 1.6 показано розходження в енергетичних діаграмах діелектриків, напівпровідників і провідників.

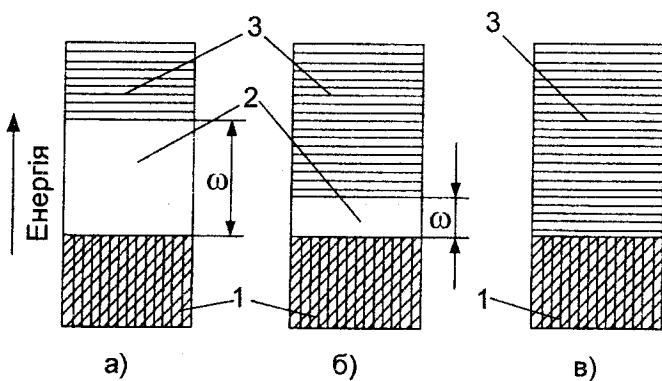


Рисунок 1.6 – Енергетичні діаграми діелектриків (а), напівпровідників (б) і провідників (в) при абсолютному нулі згідно з зонною теорією твердого тіла (1 – заповнена електронами зона, 2 – заборонена зона, 3 – зона вільних енергетичних рівнів)

Діелектриками будуть такі матеріали, у яких заборонена зона настільки велика, що електронної електропровідності в звичайних умовах не спостерігається. Діелектричні матеріали мають надзвичайно велике значення для електротехніки. Вони використовуються в різних електротехнічних пристроях для створення електричної ізоляції, яка оточує струмопровідні частини, відокремлюючи їх одну від одної, що перебувають під дією різних електричних потенціалів, а також в конденсаторах для створення певного значення електричної ємності. Тому діелектрики часто називають електроізоляційними матеріалами. До електроізоляційних матеріалів висуваються різні вимоги. Крім електроізоляційних властивостей велике значення мають механічні, теплові та інші фізико-хімічні властивості. Важливе значення має також вартість і дефіцитність матеріалів.

За агрегатним станом електроізоляційні матеріали діляться на тверді, рідкі й газоподібні.

Напівпровідниками будуть речовини з більш вузькою забороненою зоною, яка може бути подолана за рахунок зовнішніх енергетичних впливів.

При відсутності в напівпровіднику вільних електронів (при нулевій Кельвіна) прикладена до нього різниця електричних потенціалів не викликає струму. Якщо ззовні буде прикладена енергія, достатня для переходу електронів через заборонену зону, то, ставши вільними, електрони зможуть переміщатися і під дією електричного поля, створюючи електронну електропровідність напівпровідника.

У заповненій зоні, звідкіль пішов електрон, утворилася «електронна

дірка», а тому в напівпровіднику почнеться інший, «естафетний», рух електронів, які заповнюють дірку, причому під впливом електричного поля дірка буде рухатися в напрямку поля, як еквівалентний додатний заряд.

Процес переходу електронів у вільний стан супроводжується і зворотним явищем, тобто поверненням електронів у нормальний стан. У результаті в речовині настає рівновага, тобто кількість електронів, що переходять у вільну зону, стає рівною кількості електронів, що повертаються назад у заповнену зону.

З підвищенням температури число вільних електронів у напівпровіднику зростає, а зі зниженням температури до абсолютного нуля – убуває аж до нуля. Таким чином, електропровідність речовин при різних температурах може бути істотно різною.

Енергію, необхідну для переходу електрона у вільний стан або для утворення дірки, може давати не лише тепловий рух, але й інші джерела енергії, наприклад світло, потік електронів і ядерних частинок, електричні і магнітні поля, механічні впливи та інші.

Електричні властивості визначаються умовами взаємодії атомів речовини і не є неодмінною особливістю даного атома. Наприклад, вуглець у вигляді алмазу є діелектриком, а у вигляді графіту має велику провідність.

Домішки і дефекти кристалічних ґраток сильно впливають на електричні властивості твердих тіл.

До напівпровідників належать такі основні матеріали: кремній, германій, селен, телур, сірка та інші. В практичному застосуванні поділяються на прості напівпровідники, напівпровідникові хімічні з'єднання та напівпровідникові комплекси.

Провідниками будуть матеріали, у яких заповнена електронами зона впритул прилягає до зони вільних енергетичних рівнів або навіть перекривається нею. Внаслідок цього електрони в металі можуть переходити з рівнів заповненої зони на незайняті рівні вільної зони навіть під впливом слабких напруженостей прикладеного до провідника електричного поля.

До провідникових матеріалів відносять матеріали високої провідності, з яких виготовляють струмопровідні частини електричних машин і апаратів, обмотки, контакти, проводи і кабелі та сплави високого опору для виготовлення резисторів, електронагрівальних пристроїв, реостатів, термопар тощо.

1.3 Класифікація речовин за магнітними властивостями

За магнітними властивостями матеріали поділяються на слабомігнітні і сильномагнітні. До перших належать діамагнетики і парамагнетики, до других – магнітні матеріали, що знайшли найбільше застосування в техніці в залежності від особливостей їхніх магнітних властивостей.

Діамагнетики – це речовини з магнітною проникністю $\mu < 1$, значення якої не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. До них відносять водень, інертні гази, більшість органічних сполук, кам'яну сіль і ряд металів: мідь, цинк, срібло, золото, ртуть, а також вісмут, галій, сурму.

Парамагнетики – це речовини з магнітною проникністю $\mu > 1$, яка також не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. У їхнє число входять кисень, оксид азоту, солі заліза, кобальту, нікелю, лужні метали, алюміній, платина.

Діамагнетики і парамагнетики за магнітними властивостями знайшли обмежене застосування в техніці.

Магнітні матеріали – матеріали, у яких $\mu \gg 1$ і залежить від напруженості магнітного поля. До них відносять залізо, нікель, кобальт і їхні сплави, сплави хрому і марганцю, гадоліній, ферити, різні сполуки. Магнітні матеріали застосовуються для виготовлення осердь трансформаторів, магнітних систем електричних машин, в апаратах, приладах тощо. Стосовно електричного струму більшість магнітних матеріалів є провідниками. Основу магнітних матеріалів складає залізо і його сплави.

При виготовленні ЕТМ використовуються різні методи хімічного синтезу, штучне вирощування монокристалів; нанесення тонких плівок на відповідні підкладки; різні способи особливо глибокого очищення (технологія зонного плавлення; плавлення та розпил у вакуумі й інші) або введення домішок; іонно-плазмова обробка; дія на ЕТМ електромагнітного поля та проникливих випромінювань тощо.

1.4 Контрольні питання

1. Охарактеризуйте роль ЕТМ для забезпечення надійної роботи електроустановок.
2. Види зв'язку та їх характеристика.
3. Ковалентний зв'язок, полярні та неполярні молекули.
4. Іонний зв'язок.
5. Металевий зв'язок.
6. Молекулярний зв'язок.
7. Характеристика провідників.
8. Характеристика напівпровідників.
9. Характеристика діелектриків.
10. Характеристика магнітних провідників.
11. Вплив зовнішнього середовища на роботу ЕТМ.

2 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

2.1 Діелектрик в електричному полі

Для будь-якого діелектрика характерним процесом, що виникає при дії на нього електричного поля, є поляризація – обмежений зсув зв'язаних зарядів або орієнтація дипольних молекул.

Про явища, зумовлені поляризацією діелектрика, можна судити за значенням діелектричної проникності, а також кута діелектричних втрат, якщо поляризація діелектрика супроводжується розсіюванням енергії, яка викликає нагрівання діелектрика. У нагріванні технічного діелектрика можуть брати участь нечисленні вільні заряди, що зумовлюють виникнення під впливом електричного поля незначного наскрізного струму, який проходить крізь товщу діелектрика і по його поверхні. Наявність наскрізного струму свідчить про явище електропровідності технічного діелектрика, яка чисельно характеризується значеннями питомої об'ємної і питомої поверхневої електропровідностей, або оберненими відповідними їм значеннями питомих об'ємного і поверхневого електричних опорів.

Будь-який діелектрик можна використовувати тільки при напрузі, що не перевищує граничного значення в певних умовах. При перевищенні цього значення напруги настає пробій діелектрика – повна втрата ним електроізоляційних властивостей. Цю граничну напругу називають пробивною напругою, а відповідне значення напруженості однорідного електричного поля – електричною міцністю діелектрика.

2.2 Поляризація діелектриків і діелектрична проникність

Під впливом електричного поля зв'язані електричні заряди діелектрика зміщаються в напрямку сил, які діють на них, і тим більше, чим вище напруженість поля. При знятті електричного поля заряди повертаються в початковий стан. В полярних діелектриках, що містять дипольні молекули, вплив електричного поля викликає орієнтацію диполів, при відсутності поля диполі знаходяться в тепловому русі.

Більшість діелектриків характеризується лінійною залежністю електричного зміщення від напруженості електричного поля, утвореного в діелектрику. Особливу групу складають діелектрики, у яких зі зміною напруженості поля електричне зміщення залежить нелінійно. Такі діелектрики називаються сегнетоелектриками.

Будь який діелектрик з нанесеними на нього електродами і включений в електричне коло можна уявити як конденсатор певної ємності (рис. 2, а).

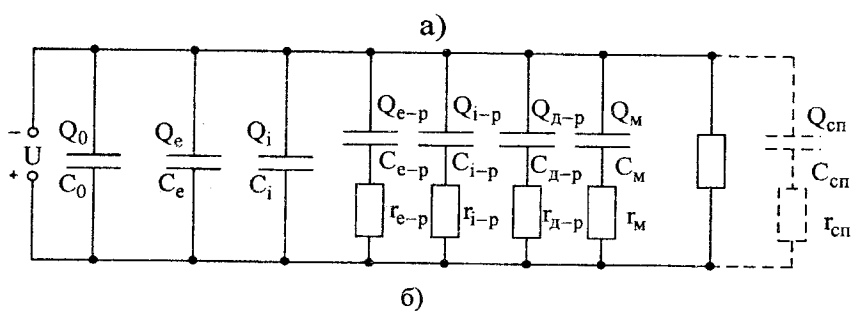
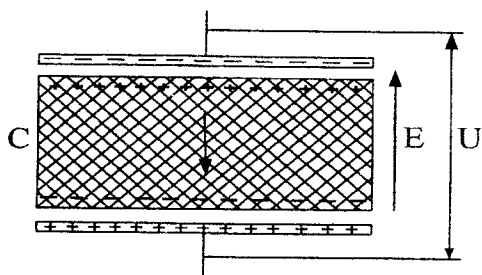


Рисунок 2.1 – Діелектрик складної сполуки з різними механізмами поляризації в електричному полі (а) та еквівалентна схема його заміщення (б)

Заряд конденсатора визначається:

$$Q = C \cdot U, \quad (2.1)$$

де C – ємність конденсатора;
 U – прикладена до нього напруга.

Заряд конденсатора Q при заданому значенні прикладеної напруги складається з двох складових: Q_0 – заряду, коли між пластинами конденсатора є вакуум, і Q_d – заряду конденсатора з діелектриком.

$$Q = Q_0 + Q_d. \quad (2.2)$$

Однією з найважливіших характеристик діелектрика є відносна діелектрична проникність – ϵ .

Ця величина являє собою відношення заряду, отриманого при деякій напрузі на конденсаторі, що містить даний діелектрик, до заряду конденсатора тих же розмірів, якби між пластинами був вакуум:

463175

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (2.3)$$

З виразу (2.3) випливає, що відносна діелектрична проникність будь-якої речовини більше одиниці і дорівнює одиниці тільки у випадку вакууму.

Співвідношення (2.1), наведене вище, може бути подане у вигляді:

$$Q = Q_0 \cdot \varepsilon = C \cdot U = C_0 \cdot U \cdot \varepsilon, \quad \text{звідки} \quad \varepsilon = C / C_0, \quad (2.4)$$

де C_0 – ємність конденсатора, коли між його пластинами є вакуум.

З формули (2.4) видно, що діелектричну проникність речовини ε можна визначити як відношення ємності конденсатора з даним діелектриком до ємності конденсатора тих же розмірів, діелектриком якого є вакуум.

Між пластинами конденсатора можуть бути речовини з різним значенням ε . Для двох таких речовин діелектрична проникність визначається:

$$\varepsilon^X = \Theta_1 \varepsilon_1^X + \Theta_2 \varepsilon_2^X, \quad (2.5)$$

де $\Theta_1 + \Theta_2 = 1$ – об'ємні концентрації компонентів;

$x = (+1 \text{ до } -1)$ – константа, що характеризує розподіл компонентів.

При паралельному з'єднанні компонентів $x = +1$:

$$\varepsilon = \Theta_1 \varepsilon_1 + \Theta_2 \varepsilon_2; \quad (2.6)$$

При послідовному з'єднанні компонентів $x = -1$:

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Theta_1}{\varepsilon_1} + \frac{\Theta_2}{\varepsilon_2}. \quad (2.7)$$

Діелектрична проникність залежить від температури і визначається виразом:

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (2.8)$$

Формула (2.8) дозволяє обчислити відносну зміну діелектричної проникності при підвищенні температури на один градус. Ця величина називається температурним коефіцієнтом діелектричної проникності.

Діелектрична проникність залежна від агрегатного стану діелектриків.

2.2.1 Діелектрична проникність газів

Газоподібні речовини характеризуються малою щільністю за рахунок великої відстані між молекулами. Тому діелектрична проникність усіх газів незначна і близька до 1.

Залежність діелектричної проникності газів від температури і тиску визначається зміною числа молекул в одиниці об'єму газу n_0 . Це число прямо пропорційно тиску і обернено пропорційно абсолютній температурі. В табл. 2.1 наведена залежність ϵ від тиску деяких газів, а в табл. 2.2 – залежність ϵ повітря від температури.

Таблиця 2.1 – Залежність ϵ від тиску деяких газів

Повітря		Вуглекислий газ		Азот	
Тиск (МПа)	ϵ	Тиск (МПа)	ϵ	Тиск (МПа)	ϵ
0,1	1,00058	0,1	1,00098	0,1	1,0006
2	1,0108	2	1,020	2	1,0109
4	1,0218	4	1,050	10	1,055

Таблиця 2.2 – Залежність ϵ повітря від температури

Температура		ϵ
°C	K	
+60	333	1,00052
+20	293	1,00058
-20	213	1,00081

Температурна залежність діелектричної проникності газів визначається за формулою (2.8).

Величину TK_ϵ неполярного газу можна знайти за виразом:

$$TK_\epsilon = \frac{(\epsilon - 1)}{T}. \quad (2.9)$$

Залежність діелектричної проникливості газу від тиску характеризують виразом:

$$\frac{\epsilon - 1}{p} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{dt}. \quad (2.10)$$

Для повітря при $p = 0,1$ МПа:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{1,00058 - 1}{0,1} = 0,0508 \text{ МПа}^{-1}.$$

Число молекул в одиниці об'єму газу n_0 визначається :

$$n_0 = \frac{P}{k \cdot T}. \quad (2.11)$$

2.2.2 Діелектрична проникність рідких діелектриків

Рідкі діелектрики можуть бути утворені з неполярних і полярних молекул.

Залежність ε неполярних рідин від температури і частоти наведена на рис. 2.2.

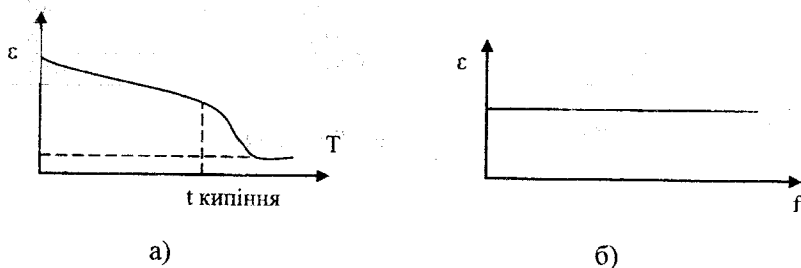


Рисунок 2.2 – Залежність ε неполярних рідин від температури (а) і частоти (б)

Для полярної рідини графік залежності ε від температури $\varepsilon = f(t^\circ)$ наведений на рис. 2.3.

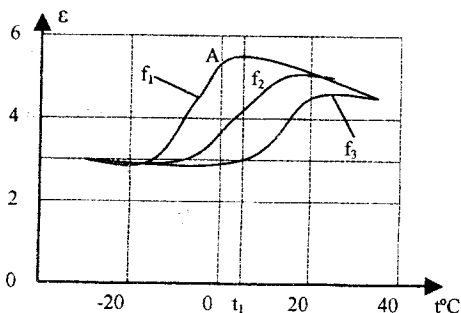


Рисунок 2.3 – Залежність діелектричної проникливості від температури для полярної рідини совола ($f_1 = 50$ Гц; $f_2 = 400$ Гц; $f_3 = 1000$ Гц)

Графік залежності ϵ полярної рідини $\epsilon = f(f)$ від частоти наведений на рис. 2.4.

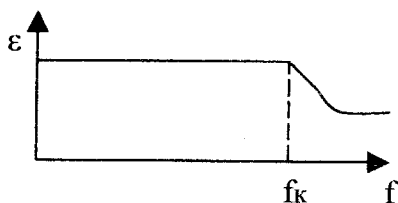


Рисунок 2.4 – Залежність діелектричної проникливості від частоти для полярної рідини

Значення критичної частоти f_k , при якій починається зниження ϵ (рис. 2.4) визначається за формулою:

$$f_k = \frac{kT}{8\pi^2 r^3 \eta}, \quad (2.12)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – стала Больцмана;

T – температура;

r – радіус молекул;

η – динамічна в'язкість речовини.

Час релаксації молекул t_k пов'язаний з частотою f_k співвідношенням:

$$f_k = \frac{1}{2\pi t_k}, \quad (2.13)$$

де t_k – час релаксації молекул.

Діелектрична проникність для неполярних і слабополярних рідин знаходиться в межах $2,1 \div 2,3$, а для полярних рідин – $\epsilon = 3,5 \div 5$.

2.2.3 Діелектрична проникність твердих діелектриків

Діелектрична проникність твердих діелектриків може мати різні чисельні значення відповідно до різних структурних особливостей твердого діелектрика. У твердих тілах є можливими всі види поляризації.

Для твердих неполярних діелектриків характерні ті ж закономірності, що і для неполярних рідин і газів.

Значення ϵ неполярних твердих діелектриків при $t^\circ = 20^\circ \text{C}$:

Парафін : $\epsilon = 1,9 \div 2,2$	} електронна поляризація
Полістирол : $\epsilon = 2,4 \div 2,6$	
Сіра : $\epsilon = 2,6 \div 4,0$	
Алмаз : $\epsilon = 5,6 \div 5,8$	

Тверді діелектрики, що являють собою іонні кристали з щільним упакуванням частинок, мають електронну і іонну поляризацію, значення діелектричної проникливості їх лежить у широких межах.

Тверді діелектрики, що мають іонну, електронну та іонно-релаксаційну поляризацію, характеризуються у більшості випадків порівняно невисоким значенням ϵ .

Значення ϵ іонних кристалів:

Кам'яна сіль (NaCl) : $\epsilon = 6$	} <u>щільне упакування іонів : електронна та іонна поляризація</u>
Корцид (Al_2O_3) : $\epsilon = 10$	
Рутил (TiO_2) : $\epsilon = 110$	
Титанат кальція	
(CaO · TiO_2) : $\epsilon = 150$	

Для неорганічних скляних матеріалів ϵ лежить у порівняно вузьких межах: $\epsilon = 4 \div 20$.

Значення ϵ для неорганічного скла:

Плавлений кварц : $\epsilon = 4,5$	} електронно-іонна поляризація
Лужне скло : $\epsilon = 6,5$	
Баритове скло : $\epsilon = 10,0$	

Значення ϵ для органічних твердих діелектриків:

Целюлоза : $\epsilon = 6,5$	} електронно-іонна поляризація
Фенолоформальдегідна смола : $\epsilon = 4,5$	
Органічне скло : $\epsilon = 4,0$	

Діелектрична проникливість сегнетоелектриків має різко виражену залежність від напруженості поля і температури.

Деякі значення ϵ для сегнетоелектриків в слабких полях при $t^{\circ} = 20^{\circ}C$:

Сегнетова сіль ($\text{NaKCuH}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$): $\epsilon = 500 \div 600$	} спонтанна електронно – іонна, іонно – релаксаційна поляризація
Титанат барію (BaTiO_3): $\epsilon = 1500 \div 2000$	
Титанат барію з домішками: $\epsilon = 7000 \div 9000$.	

2.3 Основні види поляризації діелектриків

Поляризація діелектриків залежно від агрегатного стану і структури поділяється на два основних види.

До першого виду належить поляризація, що відбувається в діелектрику під впливом електричного поля практично миттєво, пружно, без розсіювання енергії, тобто без виділення тепла.

Другий вид поляризації не відбувається миттєво, а наростає й убуває уповільнено та супроводжується розсіюванням енергії в діелектрику, тобто його нагріванням. Такий вид поляризації називають релаксаційною поляризацією.

До першого виду поляризації належать електронна й іонна, інші механізми належать до релаксаційної поляризації. Особливим механізмом поляризації є резонансна, що спостерігається в діелектриках при світлових частотах, а тому несуттєва для практичної електротехніки.

Ємність конденсатора з діелектриком і накопичений у ньому електричний заряд обумовлюються сумою різних механізмів поляризації і можуть спостерігатися в різних діелектриках. Декілька механізмів одночасно може бути і в одному матеріалі.

Еквівалентна схема заміщення діелектрика, у якому існують різні механізми поляризації, містить ряд ємностей і активних опорів, включених паралельно джерелу напруги U , як це показано на рис. 2.1, б.

Ємність C_0 і заряд Q_0 відповідають власному полю конденсатора, якщо між його пластинами є вакуум. Величини C_e і Q_e відповідають електронній поляризації.

Електронна поляризація являє собою пружне зміщення і деформацію електронних оболонок атомів. Час встановлення електронної поляризації (10^{-15} с). Електронна поляризація спостерігається в усіх видах діелектриків і не пов'язана з втратою енергії.

Іонна поляризація (C_i, Q_i) характерна для твердих тіл з іонною структурою й обумовлена пружним зміщенням зв'язаних іонів. Час встановлення іонної поляризації (10^{-13} с).

Дипольно-релаксаційна поляризація ($C_{д-р}, Q_{д-р}, \tau_{д-р}$) відрізняється від електронної та іонної тим, що вона пов'язана з орієнтацією дипольних молекул, що перебувають в хаотичному русі, під дією електричного поля й характерна для полярних газів і рідин. Цей вид поляризації може спостерігатися також і у твердих полярних органічних речовинах, але в цьому випадку поляризація обумовлена вже не поворотом самої молекули,

а поворотом наявних у ній радикалів стосовно молекули. Прикладом речовини з цим видом поляризації є целюлоза, полярність якої пояснюється наявністю гідроксильних груп ОН. У кристалах з молекулярними ґратками і слабкими Ван-дер-Ваальсовими зв'язками можлива орієнтація і більш великих часток.

Іонно-релаксаційна поляризація (C_{i-p} , Q_{i-p} , τ_{i-p}) спостерігається в неорганічних речовинах з нещільним упакуванням іонів. У цьому випадку слабо зв'язані іони речовини під дією зовнішнього електричного поля орієнтуються в напрямку поля. З підвищенням температури іонно-релаксаційна поляризація помітно підсилюється.

Електронно-релаксаційна поляризація (C_{e-p} , Q_{e-p} , τ_{e-p}) відрізняється від електронної та іонної і виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових (дефектних) електронів або дірок.

Міграційна поляризація (C_m , Q_m , τ_m) характерна для твердих тіл неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і при наявності домішок. Ця поляризація проявляється при низьких частотах і пов'язана зі значним розсіюванням електричної енергії. Причинами такої поляризації є провідні і напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів з різною провідністю та інші.

При внесенні неоднорідних матеріалів в електричне поле вільні електрони й іони провідних і напівпровідних включень переміщуються в межах кожного включення, утворюючи великі поляризовані області.

На рис. 2:1 штриховими лініями показані також C_{sp} , Q_{sp} і τ_{sp} , що належать до механізму самовільної (спонтанної) поляризації. Цей вид поляризації характерний для сегнетоелектриків. У речовинах з самовільною поляризацією є окремі області (домени), у яких є діелектричний момент при відсутності зовнішнього поля. Орієнтація електричних моментів у різних доменах різна. Накладення зовнішнього поля сприяє переважній орієнтації електричних моментів доменів у напрямку поля, що дає ефект дуже сильної поляризації. На відміну від інших видів поляризації при деякому значенні напруженості зовнішнього поля настає насичення і не відбувається зростання інтенсивності поляризації. Тому діелектрична проникність при спонтанній поляризації залежить від напруженості електричного поля. У температурній залежності спостерігається один або кілька максимумів. У змінних електричних полях матеріали з самовільною поляризацією характеризуються значним розсіюванням енергії.

Залежно від виду поляризації всі діелектрики діляться на кілька груп.

До першої групи можна віднести діелектрики, що мають в основному, тільки електронну поляризацію, наприклад, неполярні і слабополярні тверді речовини в кристалічному і аморфному станах (парафін, сірка, полістирол), а також неполярні і слабополярні рідини і гази (бензол, водень та ін.).

До другої групи належать діелектрики, що мають одночасно електронну та дипольно-релаксаційну поляризацію. Серед них полярні (дипольні) органічні, напіврідкі і тверді речовини (масляно-каніфольні компаунди, епоксидні смоли, целюлоза, деякі хлоровані вуглеводні та ін.).

Третю групу складають тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною та іонно-електронно-релаксаційною поляризаціями. У цій групі доцільно виділити дві підгрупи матеріалів через істотне розходження їхніх електричних характеристик:

- 1) діелектрики з електронною та іонною поляризаціями,
- 2) діелектрики з електронною, іонною та релаксаційними поляризаціями.

До першої переважно відносять кристалічні речовини з щільним упакуванням іонів (кварц, слюда, кам'яна сіль, корунд, рутил). До другої належать неорганічне скло, матеріали, що містять склоподібну фазу (порцеляна, мікалекс), та кристалічні діелектрики з нещільним упакуванням іонів у ґратках.

Четверту групу складають сегнетоелектрики, що характеризуються спонтанною, електронною, іонною та електронно-іонно-релаксаційною поляризаціями: сегнетова сіль, метатитанат барію та інші.

Наведена вище класифікація діелектриків дозволяє визначати їх основні електричні властивості.

2.4 Контрольні питання

1. Фізичний смисл діелектричної проникності.
2. Діелектрична проникність газів.
3. Діелектрична проникність рідких діелектриків
4. Діелектрична проникність твердих діелектриків.
5. Діелектрична проникність комбінованих діелектриків.
6. Залежність діелектричної проникності від температури і тиску.
7. Схема заміщення діелектриків.
8. Основні види поляризації діелектриків.

3 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

3.1 Основні поняття

Практично всі електроізоляційні матеріали під дією електричної напруги пропускають деякий (зазвичай, дуже малий) струм, тобто не є ідеальними через наявність деякої електропровідності. Електропровідність твердих діелектриків пояснюється наявністю в них вільних електричних зарядів, що породжується, в основному, переміщенням слабо закріплених іонів випадкових домішок та іонів самого діелектрика (особливо при високих температурах). У твердих діелектриках вільні заряди можливі не тільки в їх об'ємах, а й у тонкому шарі вологи та різних забруднень на їх поверхні. Тому в твердих діелектриках розрізняють об'ємну та поверхневу електропровідності.

Для порівняння різних діелектриків з точки зору їх електропровідності використовують питому об'ємну γ_v та питому поверхневу γ_s електропровідності або питомий об'ємний ρ_v та питомий поверхневий ρ_s опори. З курсу фізики відомо, що питома електропровідність γ залежить від концентрації вільних зарядів n , їх рухливості u і величини заряду q :

$$\gamma = q \cdot n \cdot u. \quad (3.1)$$

Рухливість вільних електронів при їх наявності в діелектрику суттєво не відрізняється від рухливості електронів у металах. Невелику електропровідність діелектриків можна пояснити тільки незначною концентрацією в них вільних зарядів.

Поверхнева провідність обумовлюється здатністю діелектрика адсорбувати на своїй поверхні вологу та пил, і тому вона залежить від стану поверхні самого діелектрика та властивостей навколишнього середовища. Поверхня неполярних діелектриків змочується та забруднюється меншою мірою порівняно з полярними. На гладкій і рівній поверхні діелектрика адсорбується менше вологи і забруднювальних речовин, тому питомий поверхневий опір ρ_s такого діелектрика значно більший, ніж питомий поверхневий опір того ж матеріалу з шершавою поверхнею.

При підвищенні температури діелектрика зростає рухливість його вільних зарядів (це стосується у першу чергу іонів) та їх концентрація завдяки тепловій дисоціації молекул. Це викликає ріст електропровідності та зменшення величини ρ_v . Електропровідність твердих діелектриків залежить також від величини діючої напруги.

При високій напрузі частково руйнуються полярні молекули або вириваються електрони з атомів, що призводить до збільшення концентрації вільних зарядів і зростання електропровідності діелектрика.

Електропровідність твердих діелектриків збільшується в разі їх зволоження, якщо вони мають гігроскопічну структуру.

Питомий об'ємний опір полярних твердих діелектриків звичайно нижчий, ніж у неполярних. Пояснюється це складністю очищення полярних діелектриків та легкістю руйнування їх молекул електричним полем.

За величинами питомого об'ємного ρ_v і питомого поверхневого ρ_s опорів діелектрики умовно розподіляються на:

високоякісні – $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_s = 10^{14} \dots 10^{16} \text{ Ом}$;

якісні – $\rho_v = 10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_s = 10^{10} \dots 10^{13} \text{ Ом}$;

задовільні – $\rho_v = 10^6 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\rho_s = 10^8 \dots 10^9 \text{ Ом}$.

Поляризаційні процеси викликають у діелектриках протікання поляризаційних струмів. Ці струми називають струмами абсорбції ($i_{аб}$). При постійній напрузі вони протікають в моменти включення і відключення джерела живлення, а при змінній напрузі вони мають місце протягом усього часу знаходження діелектрика в електричному полі. Наявність в технічних діелектриках невеликої кількості вільних зарядів приводить до виникнення слабких за величиною наскрізних струмів ($i_{нк}$) (рис. 3.1). Загальне значення струму, який протікає через діелектрик, визначається за формулою:

$$i = i_{нк} + i_{аб}, \quad (3.2)$$

де $i_{аб}$ – струм абсорбції (поляризації);

$i_{нк}$ – наскрізний струм.

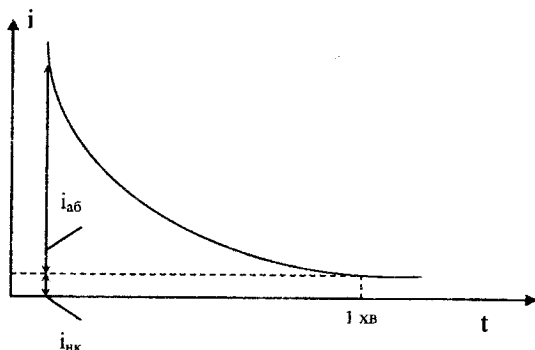


Рисунок 3.1 – Залежність струму через діелектрик від часу

Як видно з рис. 3.1, після завершення поляризації через діелектрик протікає тільки наскрізний струм.

Дійсний опір діелектрика буде дорівнювати:

$$R_d = \frac{U}{i - \sum i_n} = \frac{U}{i_{нк}}, \quad (3.3)$$

де U – напруга;

i – струм, що протікає через діелектрик;

$i_{нк}$ – наскрізний струм;

$\sum i_n = i_{аб}$ – сума струмів, обумовлених поляризацією.

Електропровідність діелектрика характеризується питомою поверхневою (ρ_s) і питомою об'ємною (ρ_v) провідностями.

У системі Сі питомий об'ємний опір (ρ_v) дорівнює опору куба з ребром в 1 м, подумки вирізаного з досліджуваного матеріалу, якщо струм проходить крізь куб від однієї грані до протилежної.

Питомий об'ємний опір (Ом·м) визначається за формулою:

$$\rho_v = \frac{R \cdot S}{h}, \quad (3.4)$$

де R – об'ємний опір зразка (Ом);

S – площа електрода (m^2);

h – товщина зразка (м).

Питома об'ємна провідність γ вимірюється в $См \cdot м^{-1}$.

Питомий поверхневий опір – опір квадрата будь-яких розмірів подумки виділеного на поверхні матеріалу, якщо струм проходить через квадрат від однієї його сторони до протилежної.

Питомий поверхневий опір:

$$\rho_s = \frac{R_s d}{l}, \quad (3.5)$$

де R_s – поверхневий опір зразка матеріалу (Ом);

d – ширина електродів (м);

l – відстань між електродами (м).

Добуток опору ізоляції діелектрика конденсатора і його ємності прийнято називати постійною часу τ_0 саморозряду конденсатора:

$$\tau_0 = R_d \cdot C; \quad (3.6)$$

$$U = U_0 \cdot e^{\left(\frac{-\tau}{\tau_0}\right)}, \quad (3.7)$$

де U – напруга на електродах конденсатора через час τ після відключення його від джерела напруги;

U_0 – напруга, до якої був заряджений конденсатор ($\tau = 0$);

R_d – опір ізоляції діелектрика (опір наскрізному струму);

C – ємність конденсатора.

Величину τ_0 згідно (3.6) визначають в (Ом·Ф), (МОм·мкФ) або в (с) секундах:

$$\text{Ом} \cdot \text{Ф} = \frac{B}{A} \cdot \frac{A \cdot C}{B} = C.$$

Аналізуючи (3.6), зауважимо, що τ_0 – це час, за який напруга на вводах конденсатора зменшиться внаслідок саморозрядження в $e = 2,7 \dots$ раза.

3.2 Електропровідність газів

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля мають винятково малу провідність. Якщо іонізація нейтральних молекул газу виникає під дією зовнішніх факторів (рентгенівські промені, ультрафіолетові промені, космічні промені, радіоактивне випромінювання, термічні дії (нагрівання газу), то така електропровідність газу називається несамостійною, а якщо за рахунок ударної іонізації газу – самостійною. Одночасно частина додатних іонів з'єднується з від'ємними частинками і утворюються нейтральні молекули. Такий процес називається рекомбінацією. Рекомбінація обмежує ріст кількості іонів в газі.

Якщо іонізований газ знаходиться між двома плоскими паралельними електродами, до яких прикладена електрична напруга, то іони під впливом напруги будуть переміщуватися. В ланцюзі виникне струм. Частина іонів буде нейтралізуватися на електродах, частина – зникати за рахунок рекомбінації.

На рис. 3.2 показано характер залежності струму від напруги.

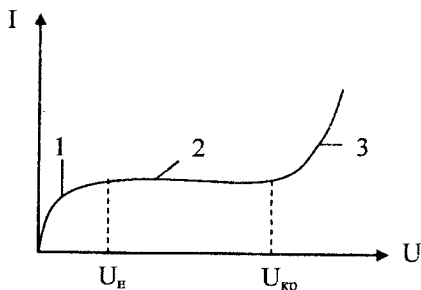


Рисунок 3.2 – Залежність струму в газі від напруги

На початковій ділянці 1 кривої до напруги U_n виконується закон Ома, коли кількість додатних і від'ємних іонів достатня і її можна вважати постійною. Зі зростанням прикладеної напруги іони не встигають

рекомбінуватись, і при деякій напрузі в газовому проміжку вони будуть розряджатися на електродах, що відповідає ділянці 2 (струм насичення).

Струм насичення досягається для повітря в нормальних умовах при відстані між електродами 10 мм і напруженості поля біля 0,6 В/м. Реальне значення густини струму насичення повітря досить мале і складає приблизно 10-15 (А/м²). Тому повітря можна розглядати як ідеальний діелектрик до тих пір, поки не з'являться умови для появи ударної іонізації. Ділянка 3 відповідає появі самостійної електропровідності при виникненні ударної іонізації, струм зростає.

3.3 Електропровідність рідин

Питома електропровідність рідких діелектриків залежить від температури. Зі збільшенням температури зростає рух іонів у зв'язку зі зменшенням в'язкості, може збільшуватися ступінь теплової дисоціації. Обидва ці фактори підвищують провідність.

Математично питома провідність електроізоляційної рідини описується виразом:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{a}{T}}, \quad (3.8)$$

де A і a – постійні, що характеризують дану рідину.

У неширокому інтервалі температур:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha t}, \quad (3.9)$$

де γ_0 , α – постійні величини для даної рідини;

t – температура, °С.

Для того, щоб показати залежність питомої провідності рідини від її в'язкості, користуються законом Стокса для руху кулі у в'язкому середовищі під дією постійної сили. При цьому встановлена швидкість знаходиться за формулою:

$$v = \frac{F}{6\pi r \eta}, \quad (3.10)$$

де F – сила;

r – радіус кулі;

η – динамічна в'язкість рідини.

Сила, що діє на носій заряду, викликає його направлене переміщення і визначається за формулою:

$$F = q \cdot E, \quad (3.11)$$

де q – заряд носія;

E – напруженість електричного поля.

Загальний вираз питомої провідності:

$$\gamma = n_0 \cdot q \cdot \frac{v}{E}, \quad (3.12)$$

де n_0 – концентрація носіїв заряду.

Підставляючи в (3.12) вирази (3.10) і (3.11), отримаємо:

$$\gamma = \frac{n_0 q F}{6\pi\eta E} = \frac{n_0 q q E}{6\pi\eta E} = \frac{n_0 q^2}{6\pi\eta}. \quad (3.13)$$

Із (3.13) отримаємо:

$$\gamma\eta = \frac{n_0 q^2}{6\pi}. \quad (3.14)$$

Формули (3.13) і (3.14) показують зв'язок електропровідності і в'язкості рідких діелектриків.

При великих напруженостях електричного поля (порядку 10-100 МВ/м), як показує досвід, струм в рідинах не підпорядковується закону Ома, що пояснюється збільшенням кількості іонів, які рухаються під впливом поля.

На рис. 3.4 показано характер залежності струму від напруженості поля в рідких діелектриках.

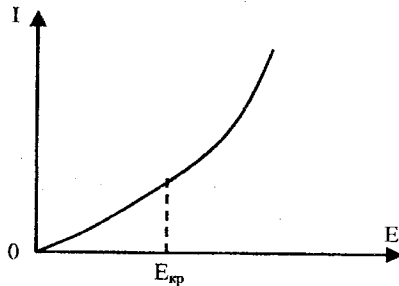


Рисунок 3.4 – Залежність струму від напруженості поля в рідких діелектриках

Для рідин високого ступеня очищення на кривій графіка можлива горизонтальна ділянка, що відповідає струму насичення (як у випадку газів).

В табл. 3.1 наведені значення питомого об'ємного опору і діелектричної проникності деяких рідин при температурі 20 °С.

Таблиця 3.1 – Зіставлення значень ϵ і ρ для рідин при $t = 20$ °С

Рідина	Особливості будови	Питомий опір ρ (Ом·м)	Діелектрична проникність ϵ
Бензол	Неполярна	10^{11} - 10^{12}	2,2
Трансформаторне масло	Неполярна	10^{10} - 10^{13}	2,2
Бензин	Неполярна	10^{10} - 10^{13}	2,0
Совол	Полярна	10^8 - 10^{10}	4,5
Касторове масло	Полярна	10^8 - 10^{10}	4,6
Ацетон	Дуже полярна	10^4 - 10^5	22
Етиловий спирт	Дуже полярна	10^4 - 10^5	33
Дистильована вода	Дуже полярна	10^3 - 10^4	81

В колоїдних системах (емульсії, суспензії) спостерігаються моліонна (електрофоретична) електропровідність, при якій носіями заряду є групи молекул – моліони.

3.4 Електропровідність твердих діелектриків

Електропровідність твердих тіл обумовлюється рухом як іонів самого електрика, так і іонів випадкових домішок, а у деяких матеріалів і наявністю вільних електронів.

Питому провідність при деякій температурі T знаходять за тією ж залежністю, що і для рідин (3.12). При цьому рухливість носіїв заряду, ($m^2/C \cdot V$) визначається за формулою:

$$\frac{v}{E} = u. \quad (3.15)$$

Припускаючи, що при іонній електропровідності кількість дисоційованих іонів і їх рухливість знаходяться в експоненціальній залежності від температури, маємо:

$$n_0 = n_{0m} \cdot e^{-\frac{\omega_n}{kT}}; \quad u = u_m \cdot e^{-\frac{\omega_p}{kT}}, \quad (3.16)$$

де k – стала Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{К}$;

n_{om} і u_m відповідають значенню $T = \infty$;

ω_d – енергія дисоціації іонів;

ω_p – енергія руху іона (перехід його з одного нерівноважного стану в інший).

Використовуючи вираз (3.12), (3.15), (3.16) і об'єднуючи постійні n_{om} , q , u_m в один коефіцієнт A отримаємо:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \quad (3.17)$$

$$\text{де } b = \frac{(\omega_d + \omega_p)}{k}.$$

Формула (3.17) показує, що чим більше значення енергії дисоціації і переміщення, тим сильніше змінюється питома провідність зі зміною температури. Чисельно зміна коефіцієнта b знаходиться з експериментально отриманої залежності питомої провідності від величини, оберненої температурі:

$$\Delta b = \frac{\Delta \ln \gamma}{\Delta \left(\frac{1}{T} \right)},$$

де Δ – інтервали зміни величин.

Зважаючи на те, що $\omega_d \gg \omega_p$, питома провідність при зміні температури визначається, основним чином, зміною концентрації носіїв n .

Вираз (3.17) аналогічний виразу (3.8), що характеризує питому провідність рідин, проте коефіцієнт A формулі (3.8) відображує рухливість іонів, що залежить від в'язкості, у той час як коефіцієнт b у формулі (3.17) в першу чергу враховує збільшення кількості вільних іонів у твердому тілі при збільшенні температури. Величина b для твердих речовин лежить у межах 10000 ÷ 22000 К.

У випадку, якщо в діелектрику струм обумовлений рухом різнорідних іонів, вираз (3.17) має вигляд:

$$\gamma = \sum A_i \exp\left(\frac{\omega_i}{kT}\right). \quad (3.18)$$

Замінюючи в (3.18) γ на $1/\rho$, після перетворень отримуємо вираз для залежності питомого об'ємного опору від температури:

$$\rho = B \cdot e^{\frac{b}{T}}, \quad (3.19)$$

або

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-dt}. \quad (3.20)$$

Із формули (3.19) температурний коефіцієнт питомого опору:

$$TK_\rho = d\rho = -\frac{b}{T^2}, \quad (3.21)$$

або із виразу (3.21)

$$TK_\rho = d\rho = -d. \quad (3.22)$$

При напруженостях поля, більших від 10-100 МВ/м, залежність питомої провідності від напруженості поля може бути виражена емпіричною формулою Пуля:

$$\gamma_E = \gamma \cdot e^{\beta E}, \quad (3.23)$$

де E – напруженість поля;

γ – питома провідність в області незалежності γ від E ;

β – коефіцієнт, що характеризує матеріал.

При напруженостях поля, близьких до пробивних значень, більш точною є формула Я. І. Франкеля:

$$\gamma_E = \gamma \cdot e^{\beta\sqrt{E}}. \quad (3.24)$$

При великих напруженостях поля необхідно враховувати можливість появи в кристалічних діелектриках електронного струму, що швидко зростає зі збільшенням напруженості поля, внаслідок чого спостерігається невиконання закону Ома.

Поверхнева електропровідність обумовлена присутністю вологи чи інших забруднень на поверхні діелектрика. Наприклад, вода має значну питому провідність, яка визначається, в основному, товщиною плівки. Проте, оскільки опір адсорбованої плівки вологи пов'язаний з природою матеріалу, на поверхні якого вона знаходиться, поверхневу електропровідність звичайно розглядають як властивість самого діелектрика.

Адсорбція вологи на поверхні діелектрика знаходиться у тісній залежності від відносної вологості навколишнього середовища. Особливо різке зменшення питомого поверхневого опору спостерігається при відносній вологості, більшій 70-80%.

Поверхнева провідність тим нижча, чим менша полярність речовини і чим чистіша поверхня діелектрика. Полярні діелектрики характеризуються нижчими значеннями ρ_s , який зменшується у вологому середовищі.

В табл. 3.2 наведені значення питомого поверхневого опору деяких матеріалів при відносній вологості 70%.

Таблиця 3.2 – Значення питомих поверхневих опорів деяких матеріалів

Діелектрик	ρ_s при неочищеній поверхні (Ом)	ρ_s після очищення поверхні (Ом)
Віконне скло	$2 \cdot 10^8$	10^{11}
Плавлений кварц	$2 \cdot 10^8$	10^{13}
Мікалекс	10^9	10^{13}

Низьке значення ρ_s мають і об'ємно-пористі матеріали, оскільки процес поглинання води товщею матеріалу стимулює утворення поверхневих плівок води.

На рис. 3.5 показано залежність питомого поверхневого опору від відносної вологості для різних типів діелектриків:

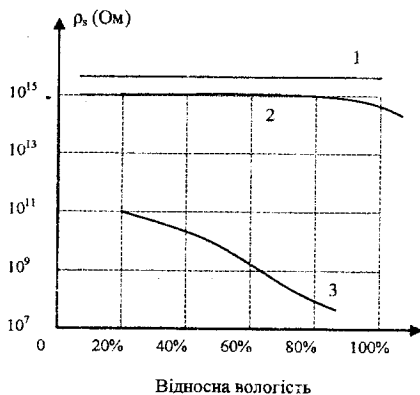


Рисунок 3.5 – Залежність питомого поверхневого опору від відносної вологості для різних типів діелектриків (1 – цезезин – неполярний діелектрик; 2 – віск бджолиний – полярний діелектрик; 3 – мармур – пористий матеріал, що має розчинні у воді домішки)

Для підвищення ρ_s проводять очищення поверхні: промивання водою, промивання розчинниками, пропалювання при $t = 600-700$ °С, тривале кип'ятіння в дистильованій воді (найефективніший метод) за умови, що поверхня не поглинає воду, кераміку і скло покривають кремнійорганічними лаками.

3.5 Контрольні питання

1. Чому діелектрики мають ненульову електропровідність?
2. Які види електропровідності можливі в твердих діелектриках?
3. Якими параметрами характеризують діелектрики з точки зору їх електропровідності?
4. Від яких чинників залежить величина питомого об'ємного опору діелектриків?
5. Чим пояснити різницю в значеннях ρ_v полярних і неполярних діелектриків?
6. За якої напруги (постійної чи змінної) необхідно вимірювати опір діелектриків і чому?
7. Електропровідність газів.
8. Електропровідність рідин.
9. Електропровідність твердих діелектриків.

4 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ

4.1 Основні поняття

Діелектричними втратами називають енергію, що розсіюється за одиницю часу в діелектрику при дії на нього електричного поля і викликає його нагрівання.

Втрати енергії в діелектрику спостерігаються як при змінній напрузі, так і при постійній, оскільки в матеріалі утворюється наскрізний струм, обумовлений провідністю.

Діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі можна характеризувати потужністю, віднесеною до одиниці об'єму, або питомими втратами; частіше для характеристики здатності діелектрика розсіювати енергію в електричному полі користуються кутом діелектричних втрат або тангенсом цього кута.

Кутом діелектричних втрат називається кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз ϕ між струмом і напругою в ємнісному колі. У випадку ідеального діелектрика вектор струму в такому колі буде випереджати вектор напруги на 90° , при цьому кут δ буде дорівнює нулеві. Чим більша розсіювана потужність в діелектрику, що переходить у тепло, тим менший кут зсуву фаз і тим більший кут діелектричних втрат δ .

Неприпустимо великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильне нагрівання, що може привести до його теплового руйнування.

Природа діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах різна в залежності від агрегатного стану речовини.

Діелектричні втрати можуть обумовлюватися наскрізним струмом або активними складовими поляризаційних струмів. При вивченні діелектричних втрат, безпосередньо пов'язаних з поляризацією діелектрика, можна показати це явище у вигляді кривих, що являють собою залежність електричного заряду на обкладках конденсатора з діелектриком від прикладеної до нього напруги (рис. 4.1).

При відсутності втрат, які були викликані явищем поляризації, заряд лінійно залежить від напруги (рис. 4.1, а), і такий діелектрик називається лінійним. Якщо в лінійному діелектрику має місце уповільнена поляризація, пов'язана з втратами енергії, то крива залежності заряду від напруги має вигляд еліпса (рис. 4.1, б). Площа цього еліпса пропорційна кількості енергії, що поглинається діелектриком за один період зміни напруги.

У випадку нелінійного діелектрика – сегнетоелектрика – крива залежності заряду від напруги має вигляд петлі такого ж характеру, як петля гістерезиса в магнітних матеріалів; в цьому випадку площа петлі пропорційна втратам енергії за один період.

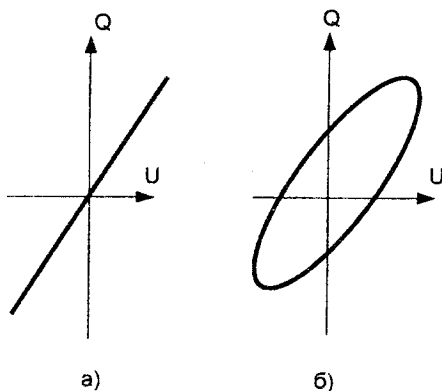


Рисунок 4.1 – Залежність заряду від напруги для лінійного діелектрика без втрат (а), з втратами (б)

У технічних ЕТМ, крім втрат від наскрізної електропровідності і втрат від уповільненої поляризації, виникають діелектричні втрати, які сильно впливають на електричні властивості діелектриків. Ці втрати проявляються наявністю ізолюваних один від одного сторонніх провідних або напівпровідних включень вуглецю, оксидів заліза тощо. При високих напругах втрати в діелектрику виникають внаслідок іонізації газових включень всередині діелектрика, що особливо інтенсивно відбувається при високих частотах.

Розглянемо схему, еквівалентну конденсатору з діелектриком, що має втрати в ланцюзі змінної напруги. Ця схема повинна бути вибрана так, щоб активна потужність, що витрачається в даній схемі, була еквівалентна потужності, що розсіюється в діелектрику конденсатора, а струм випереджав напругу на той же кут, що й у конденсаторі.

Поставлена задача може бути вирішена заміною конденсатора з втратами ідеальним конденсатором з послідовно включеним активним опором (рис. 4.2, а) або ідеальним конденсатором, який включено паралельно з активним опором (рис. 4.2, б). Такі еквівалентні схеми, звичайно, не дають пояснення механізму діелектричних втрат у реальних діелектриках і введені умовно.

Послідовна і паралельна схеми еквівалентні одна одній, якщо при рівності повних опорів $z_1 = z_2 = z$ будуть рівні їх активні та реактивні складові. Ця умова буде дотримана, якщо кути зсуву струму щодо напруги рівні а значення активної потужності однакові.

З теорії змінних струмів відомо, що активна потужність визначається за формулою:

$$P_a = U \cdot I \cdot \cos\phi. \quad (4.1)$$

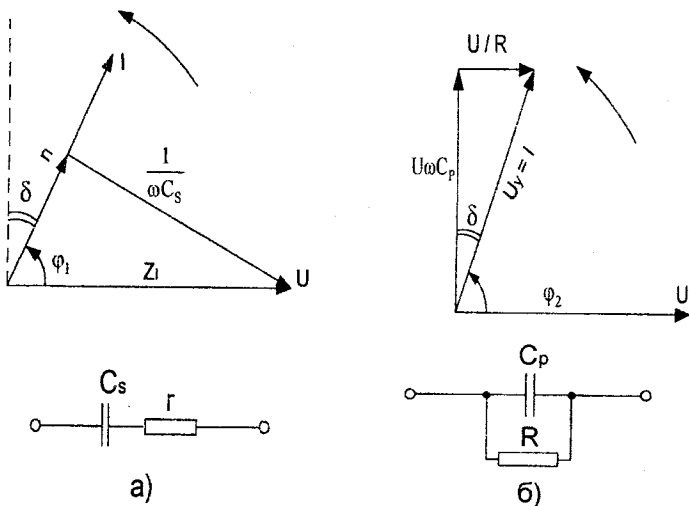


Рисунок 4.2 – Векторні діаграми та еквівалентні схеми діелектрика з втратами: а – послідовна, б – паралельна

Виразимо потужності для послідовної і паралельної схем через ємності C_s і C_p та кут δ .

Для послідовної схеми, використовуючи вираз (4.1) і відповідну векторну діаграму, маємо:

$$P_a = \frac{U}{z} \cdot \frac{Ur}{z} = \frac{U^2 r}{x^2 + r^2} = \frac{U^2 r}{x^2 \left(1 + \frac{r^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (4.2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_s \cdot r. \quad (4.3)$$

Для паралельної схеми:

$$P_a = U^2 \cdot g = U^2 \cdot b \cdot \operatorname{tg} \delta = U^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \operatorname{tg} \delta; \quad (4.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = 1/(\omega \cdot C_p \cdot r). \quad (4.5)$$

Прирівнюючи вирази (4.2) і (4.4), а також (4.3) і (4.5), знаходимо співвідношення між C_p і C_s , а також між r і R :

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (4.6)$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right). \quad (4.7)$$

Для високоякісних діелектриків можна нехтувати значенням $\operatorname{tg}^2 \delta$ у порівнянні з одиницею у формулі (4.6) і вважати $C_p \approx C_s \approx C$.

Вирази для потужності, що розсіюється в діелектрику, у цьому випадку будуть однакові для обох схем:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

де P_a – активна потужність, Вт;

U – напруга, В;

ω – кутова частота;

C – ємність, Ф.

Опір R у паралельній схемі, як впливає з виразів (4.3-4.7), у багато разів більше опору r .

Діелектричні втрати – важливий параметр діелектрика. Діелектричні втрати приводять до нагрівання діелектрика, а зміна температури, в свою чергу, – до старіння ЕТМ і, відповідно, до скорочення терміну служби обладнання.

4.2 Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах

Діелектричні втрати за їхніми особливостями і фізичною природою можна підрозділити на чотири основних види:

- діелектричні втрати, обумовлені поляризацією;
- діелектричні втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю;
- іонізаційні діелектричні втрати;
- діелектричні втрати, обумовлені неоднорідністю структури.

Перший вид особливо чітко спостерігається у речовинах, що мають релаксаційну поляризацію; це діелектрики дипольної структури та іонної структури з нещільним упакуванням іонів. Релаксаційні діелектричні втрати викликають порушення теплового руху частинок під впливом електричного поля. Це порушення призводить до розсіювання енергії та нагрівання діелектрика.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Втрати в сегнетоелектриках є значними при температурі, нижчій точки Кюрі, а при температурі більшій точки Кюрі втрати в сегнетоелектриках зменшуються.

Другий вид характерний для діелектриків, що мають змінну електропровідність (об'ємну чи поверхневу). Діелектричні втрати зростають з температурою за експоненціальним законом:

$$P_T = A \cdot e^{\frac{b}{t}}, \quad (4.8)$$

де A, b – постійні матеріалу.

Наближений вираз:

$$P_T = P_0 \cdot e^{\alpha \cdot t}, \quad (4.9)$$

де P_T – втрати при певній температурі t , °C;

P_0 – втрати при $t = 0^\circ\text{C}$;

α – постійна матеріалу.

Третій вид властивий діелектрикам у газоподібному стані. Іонізаційні втрати проявляються в неоднорідних електричних полях при напруженостях, що перевищують значенням початку іонізації даного газу.

Іонізаційні втрати обчислюються за формулою:

$$P_i = A_1 \cdot f(U - U_0)^3, \quad (4.10)$$

де A_1 – постійний коефіцієнт;

f – частота електричного поля;

U – прикладена напруга;

U_0 – напруга, що відповідає початку іонізації.

Формула справедлива при $U > U_0$ і лінійній залежності $\text{tg}(\delta)$ від E . Напруга U_0 залежить від тиску, оскільки розвиток ударної іонізації молекул залежить від довжини вільного пробігу носіїв заряду. Зі збільшенням тиску газу величина напруги початку іонізації зростає.

Четвертий вид спостерігається у діелектриках із просоченого паперу і тканини, у пластмасах з наповнювачем, в пористій кераміці та слюді. Оскільки структура неоднорідних діелектриків і їх компонентів досить різна, то не існує загальної формули розрахунку діелектричних втрат у цьому випадку.

4.3 Діелектричні втрати в газах

Діелектричні втрати в газах при напруженостях поля нижче значення, ніж необхідне для розвитку ударної іонізації молекул газу, дуже малі. У цьому випадку газ можна практично розглядати як ідеальний діелектрик.

Джерелом діелектричних втрат газу може бути, в основному, лише електропровідність, тому що орієнтація дипольних молекул газів при їхній поляризації не супроводжується діелектричними втратами.

Усі гази відрізняються досить малою електропровідністю, і кут діелектричних втрат мізерно малий, особливо при високих частотах. Питомий об'ємний опір газів – 10^{16} Ом·м, $\epsilon \approx 1$, $\text{tg } \delta$ при $f = 50$ Гц менше $4 \cdot 10^8$.

При високих напругах і неоднорідному полі, коли напруженість в окремих місцях перевищить деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, внаслідок чого в газі виникають втрати на іонізацію.

На рис. 4.3 наведена залежність $\text{tg } \delta = f(U)$ для газової ізоляції.

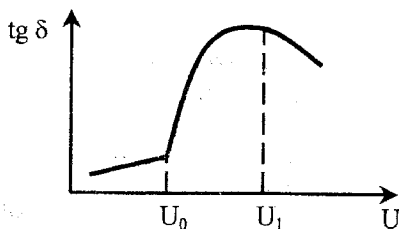


Рисунок 4.3 – Іонізаційна характеристика ізоляції

При напрузі U_0 відбувається початок іонізації газу в порах і $\text{tg } \delta$ помітно росте, а при напрузі U_1 в повітряних включеннях газ уже іонізований і енергія на процес іонізації не витрачається, $\text{tg } \delta$ зменшується. При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що це явище може призвести до розігріву діелектриків та їх руйнування, якщо напруга буде вище значення U_0 .

На лініях електропередачі високої напруги втрати на іонізацію повітря біля поверхні провідників понижують коефіцієнт її корисної дії.

4.4 Діелектричні втрати в рідких діелектриках

В неполярних рідинах діелектричні втрати обумовлені тільки електропровідністю, якщо рідина не має домішок з дипольними молекулами (наприклад, очищене нафтове конденсаторне масло).

Полярні рідини, наприклад совол, залежать від температури і частоти, тому можуть мати значні діелектричні втрати, пов'язані з дипольно-релаксаційною поляризацією, окрім втрат, обумовлених електропровідністю.

У техніці використовуються рідкі діелектрики, що являють собою суміші неполярних і полярних речовин (наприклад, масляно-каніфольні компаунди).

При підвищенні частоти ω максимум $\text{tg}\delta$ зміщується в область більш високої температури: більша частота потребує меншого часу релаксації, необхідного для отримання максимуму кута втрат δ , а для зменшення часу релаксації необхідне зниження в'язкості, тобто підвищення температури.

Час релаксації – це час, за який впорядкованість зорієнтованих полем диполів після його зняття зменшується за рахунок наявності теплового руху в $e \approx 2,7$ раза від початкового значення.

На рис. 4.4 показана залежність $\text{tg}\delta$ від t °C при різних частотах для масляно-каніфольного компаунда.

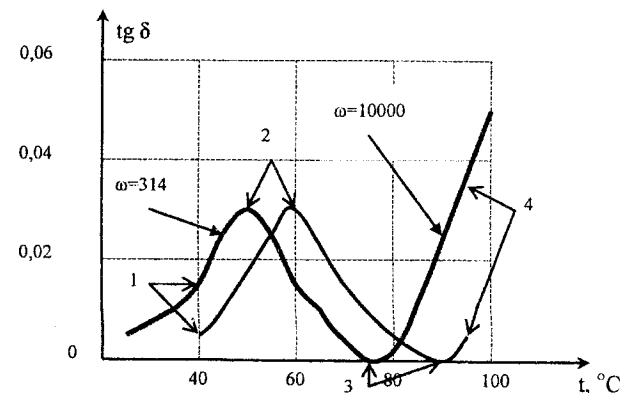


Рисунок 4.4 – Залежність $\text{tg}\delta$ від t °C при різних частотах для масляно-каніфольного компаунда

На графіках (рис. 4.4) виділено чотири області, що характеризують:

1 – якщо в'язкість речовини велика (при малих t), то молекули не встигають зорієнтуватися при змінні поля і дипольно-релаксаційна поляризація зникає ($\text{tg}\delta$ має мале значення (початок кривих));

2 – при середніх в'язкостях дипольні втрати можуть бути суттєві і при деякому значенні в'язкості мають максимум;

3 – дипольні втрати будуть малими, коли орієнтація молекул відбувається без тертя (мінімум кривої);

4 – подальше зростання $\text{tg}\delta$ з підвищенням t пояснюється ростом електропровідності (за рахунок діелектричних втрат наскрізної електропровідності).

Характер залежностей потужності P_a , що розсіюється при дипольно-релаксаційних втратах у рідкому діелектрику, а також $\text{tg}\delta$ від частоти показаний на рис. 4.5:

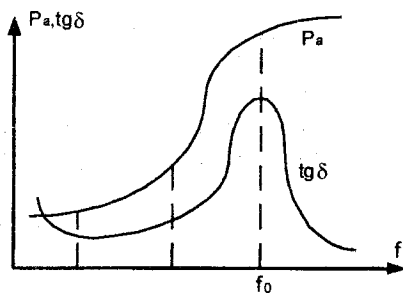


Рисунок 4.5 – Залежність P_a і $\text{tg}\delta$ від частоти для дипольної рідини

Втрати зростають з частотою доти, поки поляризація встигає слідувати за зміною поля. Коли ж частота стає настільки велика, що дипольні молекули вже не встигають орієнтуватися в напрямку поля і $\text{tg}\delta$ падає, то втрати P_a стають постійними згідно з формулою $P_a = U^2 \omega C \text{tg}\delta$. Таким чином, характер залежності діелектричних втрат P_a від частоти не відповідає характерові частотної залежності $\text{tg}\delta$.

Дипольно-релаксаційні втрати в малов'язких рідинах при низьких частотах незначні і можуть бути менше втрат наскрізної електропровідності. Нижче для порівняння наведені значення ϵ і $\text{tg}\delta$ для неполярної і полярної рідин при частоті 50 Гц:

Трансформаторне масло $\epsilon = 2,3$; $\text{tg}\delta = 0,001$.

Совол $\epsilon = 5$; $\text{tg}\delta = 0,02$.

Як видно з вищенаведеного, тангенс кута діелектричних втрат неполярної рідини – трансформаторного масла – значно менший, ніж полярної рідини – совола.

4.5 Діелектричні втрати в твердих діелектриках

Діелектричні втрати в твердих діелектриках розглядають в залежності від їх структури. За структурою тверді діелектрики поділяються на чотири групи;

- діелектрики молекулярної структури;
- діелектрики іонної структури;
- сегнетоелектрики;
- діелектрики неоднорідної структури.

Діелектричні втрати в діелектриках молекулярної структури.

Якщо молекули неполярні, а речовини не мають домішок, то діелектричні втрати дуже малі (сірка, парафін, неполярні полімери (поліетилен, політетрафторетилен, полістирол) та інші). Тому ці речовини використовуються як якісні високочастотні діелектрики.

Діелектрики молекулярної структури з полярними молекулами головним чином є органічними речовинами, наприклад, речовини на базі целюлози (папір, картон та інші); полярні полімери (поліетилметакрилат, органічне скло); поліаміди (капрон та інші); поліуретани, каучукові матеріали, ебоніт; фенолформальдегідні смоли; ефіри целюлози (ацетилцелюлоза та інші) і низка інших матеріалів.

Усі вони завдяки дипольно-релаксаційній поляризації мають великі діелектричні втрати, які суттєво залежать від температури (при деяких температурах визначаються максимум і мінімум втрат, зростання втрат після мінімуму пояснюється збільшенням втрат наскрізної провідності).

На рис. 4.6 наведена залежність $\text{tg } \delta$ від температури для висушеного паперу.

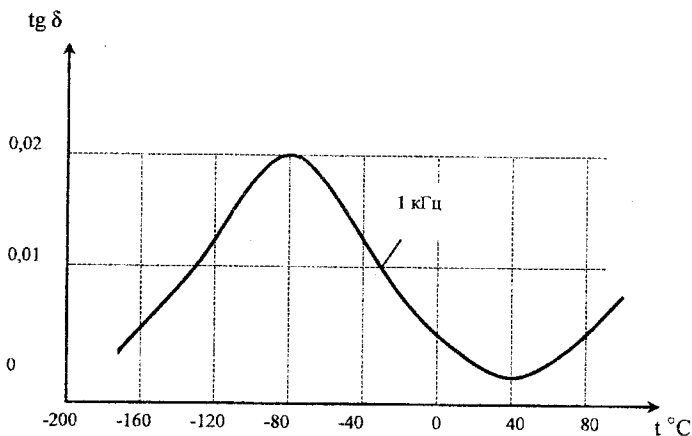


Рисунок 4.6 – Залежність $\text{tg } \delta$ від температури для висушеного паперу

Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури. У речовинах кристалічної структури з щільним упакуванням іонів при відсутності домішок діелектричні втрати досить малі. При підвищених температурах в таких речовинах (наприклад, кам'яна сіль) з'являються втрати від наскрізної електропровідності.

Речовини з кристалічною структурою з нещільним упакуванням іонів характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати. Для більшості видів електрокераміки кількість іонів релаксаційної поляризації неперервно зростає з ростом температури, і максимум $\text{tg } \delta$ відсутній.

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури (неорганічне скло) пов'язані з поляризацією та наявністю електропровідності.

Такі втрати обумовлені релаксаційною поляризацією і сильно виражені в технічному склі. Термічна обробка помітно впливає на кут діелектричних втрат скла у зв'язку зі зміною його структури.

Для більшості видів електротехнічної кераміки кількість іонів, які приймають участь в релаксаційній поляризації, збільшується з температурою, то максимум $\text{tg} \delta$ відсутній і температурна залежність $\text{tg} \delta$ подібна температурній залежності питомої провідності, яка в першому наближенні має експоненціальний характер (рис. 4.7).

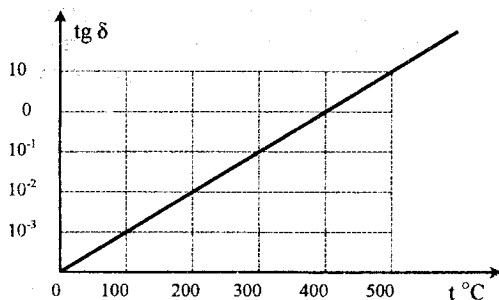


Рисунок 4.7 – Температурна залежність $\text{tg} \delta$ титанової кераміки при $f = 50$ Гц

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках. Їх особливість – це наявність самовільної поляризації, що з'являється в певному температурному інтервалі до точки Кюрі.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках мало змінюються з температурою в області спонтанної поляризації і різко падають при t °C більшій точки Кюрі, коли сегнетоелектричні властивості втрачаються.

Діелектричні втрати твердих речовин неоднорідної структури. Це матеріали, до складу яких входить не менше двох компонентів, механічно пов'язаних між собою, наприклад, кераміка. У складі кераміки розрізняють кристалічну, скловидну фази і наявність газів у закритих порах. Газові включення приводять до збільшення діелектричних втрат при високих напруженнях поля внаслідок розвитку іонізації.

Просочений папір також слід віднести до діелектриків з неоднорідною структурою. Його діелектричні втрати визначаються електричними властивостями обох компонентів, їх кількісним співвідношенням і залишковими повітряними включеннями.

На рис. 4.8 показана залежність $\text{tg} \delta$ від t °C для конденсаторного паперу. Вона має два максимуми: перший (при низьких температурах) характеризує дипольно-радикальні втрати самого паперу (целюлози), другий (при більш високій температурі) обумовлений дипольно-релаксаційними втратами просочувального компаунда.

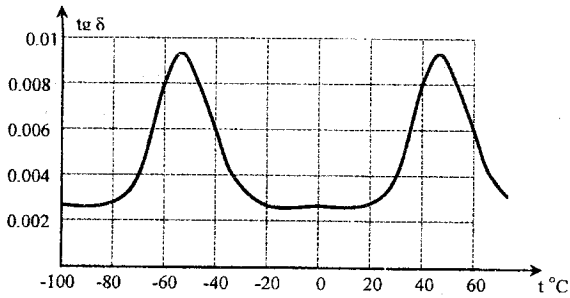


Рисунок 4.8 – Залежність $\text{tg} \delta$ від t °C для конденсаторного паперу, просоченого компаундом (80% каніфолі, 20% трансформаторного масла)

В сучасній електроізоляційній техніці неоднорідні діелектрики мають досить широке використання.

4.6 Контрольні питання

1. Діелектричні втрати при послідовній схемі заміщення діелектриків.
2. Діелектричні втрати при паралельній схемі заміщення діелектриків.
3. Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах.
4. Діелектричні втрати в газах.
5. Діелектричні втрати в рідких діелектриках.
6. Діелектричні втрати в твердих діелектриках.
7. Залежність $\text{tg} \delta = f(U)$ для газової ізоляції.
8. Залежність $\text{tg} \delta$ від t °C при різних частотах.
9. Залежність P_a і $\text{tg} \delta$ від частоти для дипольної рідини.
10. Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури.
11. Діелектричні втрати в сегнетоелектриках.
12. Діелектричні втрати твердих речовин неоднорідної структури.

5 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Явище електричного пробою пов'язане з електронними процесами в діелектрику, що виникають у сильному електричному полі і призводять до раптового (різкого) місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробою. Якщо діелектрик знаходиться в електричному полі і коли його напруженість перевищить критичне значення $E > E_{кр}$, то діелектрик втрачає властивості електроізоляційного матеріалу. Це явище носить назву пробою діелектрика або порушення його електричної міцності. Напруга, при якій відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою ($U_{пр}$), а відповідне значення напруженості поля – електричною міцністю діелектрика ($E_{пр}$).

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (5.1)$$

де h – товщина діелектрика $[1 \text{ MB}/\text{M}] = [1 \text{ KB}/\text{MM}] = [10^6 \text{ B}/\text{M}]$.

5.1 Пробій газів

Зовнішньою ізоляцією в багатьох видах електричних конструкцій (в трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередачі) є повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика порівняно з $E_{пр}$ рідких і твердих діелектриків.

У газі тепловий рух іонів при накладанні електричного поля отримує деяку додаткову енергію:

$$W = q \cdot U_{\lambda}, \quad (5.2)$$

де W – енергія заряджених частинок газу;

q – заряд;

U_{λ} – падіння напруги на довжині вільного пробігу електронів λ .

При однорідному полі $U_{\lambda} = E_{\lambda}$, де E – напруженість поля, тоді:

$$W = q \cdot E_{\lambda}. \quad (5.3)$$

Енергія заряджених частинок при зіткненні передається молекулам газу. Якщо вона достатньо велика, відбувається збудження атомів і молекул, пов'язане з переходом електронів на більш віддалену від ядра

орбіту, або їх розщеплення на електрони і позитивні іони. При цьому умовою іонізації є:

$$q \cdot E_{\lambda} \geq W_i. \quad (5.4)$$

Енергію іонізації W_i часто характеризують іонізаційним потенціалом:

$$U_i = \frac{W_i}{q}. \quad (5.5)$$

Іонізаційний потенціал для різних газів знаходиться в межах від 4 до 25 В, що відповідає енергії іонізації від $4 \div 25$ еВ.

При заданих значеннях тиску газу і температури ударна іонізація починається при певному значенні напруженості поля. Ця напруженість поля E називається початковою напруженістю.

Явище пробію газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій. Розглянемо пробій газу в однорідному полі. Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами з закругленими краями, а також між сферами великого діаметра при малій відстані між ними. У такому полі пробій настає миттєво при досягненні певної напруги, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, яка потім може перейти у дугу при достатній потужності джерела живлення. На рис. 5.1 показана залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами для однорідного поля.

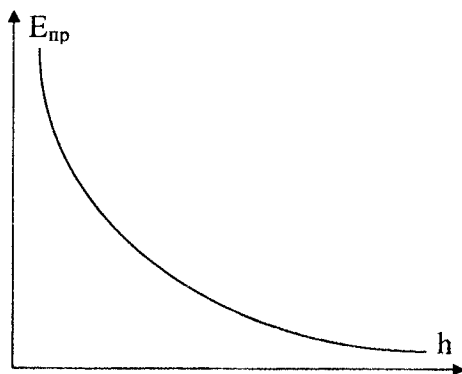


Рисунок 5.1 – Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами для однорідного поля

З графіка видно, що при невеликих відстанях між електродами значно збільшується електрична міцність. Це явище пояснюється важкістю формування розряду при малій відстані між електродами.

В неоднорідному полі пробій газу відрізняються від закономірностей в однорідному полі. Неоднорідне поле виникає між проводами ліній електропередач, між електродами з малим радіусом кривизни, між сферичними поверхнями при відстані між ними, яка перевищує радіус сфер. Особливістю пробою газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді корони у місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

У випадку електродів голка-площина і додатної полярності голки пробій відбувається при меншій напрузі, ніж при протилежній полярності (рис. 5.2). Це пояснюється тим, що іонізація газу при будь-якій полярності на електродах відбувається в районі голки, де існують найбільші значення напруженості електричного поля, і біля неї утвориться «хмара» з позитивно заряджених іонів – молекул. При позитивній полярності біля голки цей об'ємний заряд служить продовженням її і скорочується довжина розрядного проміжку. Позитивний об'ємний заряд відштовхується від позитивно зарядженої голки, однак більш рухливі електрони, що обумовлюють процес іонізації, увесь час встигають його відновлювати, тобто виходить картина «проростання» позитивного об'ємного заряду, зв'язаного з голкою, у бік негативно зарядженої площини. Тому пробій настає при меншій напрузі, ніж у випадку протилежної полярності електродів, коли об'ємний заряд частково нейтралізує та екранує голку з негативною полярністю від площини, зарядженої позитивно (рис. 5.2).

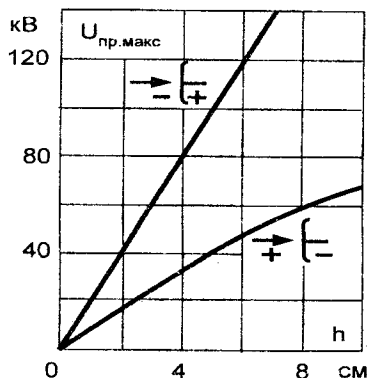


Рисунок 5.2 – Залежність пробивної напруги повітря від відстані між електродами з різною полярністю в неоднорідному полі

Електрична міцність газу досить сильно залежить від його густини (тобто від тиску, якщо температура постійна). При незначних змінах температури і тиску газу пробивна напруга пропорційна густині газу. В цьому випадку для розрахунків пробивних напруг використовується формула:

$$U_{\text{пр}} = \delta \cdot U_{\text{пр}0}, \quad (5.6)$$

де $U_{\text{пр}}$ – напруга пробою при певній температурі і тиску;

$U_{\text{пр}0}$ – напруга пробою при нормальних умовах: ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 0,1 \text{ МПа}$);

δ – відносна густина повітря (за нормальних умов $\delta = 1$) розраховується за формулою:

$$\delta = 0,386 \cdot \frac{p}{t + 273}. \quad (5.7)$$

На рис. 5.3 наведена залежність електричної міцності газу від тиску. При великих значеннях тиску та, відповідно, підвищеній щільності газу відстань між молекулами менша, тому і довжина вільного пробігу електронів теж зменшується, і, згідно з умовою (5.4), для того, щоб відбувся пробій, напруженість поля має бути збільшеною.

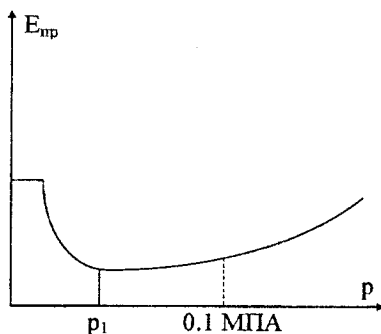


Рисунок 5.3 – Залежність електричної міцності газу від тиску

При зменшенні тиску спочатку спостерігається падіння електричної міцності, як видно з рисунка, коли тиск доходить до певної межі, нижчої від атмосферного тиску, розрідження газу досягає високого ступеня, електрична міцність зростає (це використовують у повітряних вимикачах). Таке зростання пояснюється зменшенням кількості молекул газу в одиниці об'єму при сильному розрідженні та, відповідно, зниженням імовірності

зіткнення електронів з молекулами. У цьому випадку електрична міцність досягає достатньо високих значень. Це явище використовують для конструювання вакуумних вимикачів.

Як діелектрик повітря має такі позитивні властивості: швидко відновлює свою електричну міцність після пробою, незначно змінює діелектричну проникність, діелектричні втрати повітря практично дорівнюють нулю.

Негативні властивості повітря як діелектрика: погана теплопровідність, низька електрична міцність, різка її зміна біля поверхні твердого діелектрика ($E_{пр} = 2,19...2,27$ кВ/мм), здатність зволожуватись, створювати оксиди, підтримувати горіння. Електрична міцність повітря не є постійною і залежить від його тиску, відносної вологості та ступеня однорідності електричного поля, в якому здійснюється пробій.

5.2 Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються більш високою електричною міцністю, ніж газоподібні. Наявність домішок в рідких діелектриках призводить до зниження їх електричної міцності і викликає труднощі для створення точної теорії пробою цих речовин. Чисті рідкі діелектрики отримати важко. Постійними домішками є вода, гази, тверді частинки. Пробій рідин, що мають газові включення, пояснюється місцевим перегріванням рідини. Вплив води, що не змішується з трансформаторним маслом при нормальній температурі, коли вода тримається в маслі у вигляді окремих капелек, показано на рис. 5.4. Під впливом електричного поля капельки води (сильно полярної рідини) поляризуються і створюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких відбувається електричний пробій.

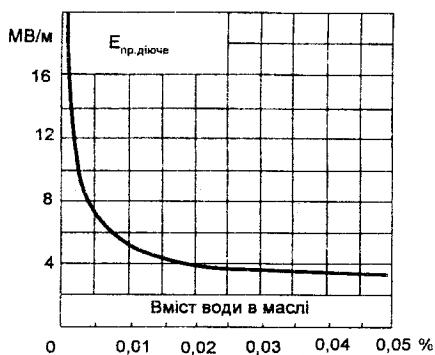


Рисунок 5.4 – Залежність електричної міцності від наявності води в трансформаторному маслі

На рисунку 5.5 показаний вплив температури на електричну міцність трансформаторного масла з домішками води.

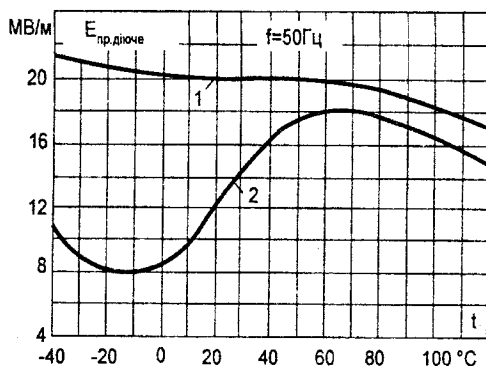


Рисунок 5.5 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури (1 – висушене масло; 2 – експлуатаційне масло)

Електрична міцність чистого масла від температури не залежить в межах до 80 °С. При 80 °С починається кипіння легких масляних фракцій і поява великої кількості кульок пару в рідині, що призводить до зниження електричної міцності. Наявність води знижує електричну міцність масла при низькій і нормальній температурі. Збільшення $E_{пр}$ при підвищенні температури обумовлене переходом води зі стану емульсії в стан молекулярного розчину. Подальше зниження $E_{пр}$ пояснюється процесами кипіння рідини. Збільшення електричної міцності при низьких t °С пов'язане зі збільшенням в'язкості масла і меншим значенням діелектричної проникності льоду у порівнянні з водою. Тверді забруднення (сажа, обривки волокон) спотворюють електричне поле всередині рідини і також призводять до зниження електричної міцності.

Очищення рідких діелектриків, зокрема масел, від домішок помітно підвищує електричну міцність. Так, наприклад, неочищене трансформаторне масло має $E_{пр} \approx 4$ МВ/м; після ретельного очищення електрична міцність масла підвищується до 20 – 25 МВ/м.

5.3 Пробій твердих діелектриків

У сучасній електротехніці використовується велика кількість найрізноманітніших видів твердих діелектриків. Серед них існують матеріали як природного походження (слюда, мармур, азбест, каніфоль), так і штучні (текстоліт, гетинакс, лакотканини, фарфор, синтетичні смоли, пластмаси). Але, незважаючи на таку різноманітність, усі тверді

діелектрики підкоряються загальним законам, які визначають їхню електричну міцність.

Найхарактернішою особливістю твердих діелектриків, яка відрізняє їх від рідких та газоподібних, є втрата ними після пробою електроізолювальних властивостей. Порушення електричної міцності твердих діелектриків може бути наслідком пробою як крізь об'єм, так і по поверхні. Пробій по поверхні звичайно називають поверхневим розрядом, або перекриттям діелектрика. Якщо пробій крізь об'єм, в основному, визначається будовою діелектрика, то розряд по його поверхні залежить не лише від властивостей самого матеріалу, а й від стану його поверхні і навколишнього середовища.

Електрична міцність діелектрика залежить від хімічної будови його матеріалу.

Крім хімічної будови на величину $E_{пр}$ твердих діелектриків впливає й фізична структура. Матеріали неоднорідної будови мають занижену величину $E_{пр}$, але, якщо вони просочені електроізоляційними матеріалами, то підвищується їх електрична міцність.

Для забезпечення надійності роботи діелектриків їх робоча напруга U_p повинна бути значно нижчою від пробивного значення.

Відношення $U_{пр}$ до U_p називається коефіцієнтом запасу електричної міцності і для кожного виду діелектрика встановлюється залежно від його фізико-хімічних властивостей та умов роботи. Особливий практичний інтерес викликає явище пробою твердих полярних і неполярних діелектриків в однорідному й неоднорідному полях. Так, електрична міцність неполярного діелектрика в однорідному електричному полі значно вища від його електричної міцності в неоднорідному полі. Зовсім інший результат отримують при випробуванні полярного діелектрика у тих самих полях. Здебільшого при випробуваннях електрична міцність у неоднорідному електричному полі може бути вища, ніж в однорідному. Це явище можна пояснити тим, що у неоднорідному полі електрод «голку» можна встановити на ділянку з ознаками неполярного діелектрика. А на електродах «площина-площина» у поле потрапляють більше ділянок, у тому числі ділянки з ознаками полярного діелектрика. На останніх ділянках і відбувається пробій при нижчих значеннях U .

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

- електричний пробій макроскопічних однорідних діелектриків;
- електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- тепловий (електротепловий) пробій;
- електрохімічний пробій.

Кожний із зазначених видів пробою може мати місце для того самого матеріалу в залежності від характеру електричного поля (постійного чи змінного, імпульсного, низької чи високої частоти), наявності в

діелектрику дефектів, зокрема закритих пор, від умов охолодження, часу впливу напруги.

Електричний пробій макроскопічних однорідних діелектриків. Цей вид пробою характеризується дуже швидким розвитком, він протікає за час $10^{-7} - 10^{-8}$ с і не обумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробі до деякої міри залежить від температури.

Електричний пробій за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з деяких початкових електронів у твердому тілі створюється електронна лавина. Електрони розсіюють енергію свого руху, накопичену в електричному полі, збуджуючи пружні коливання кристалічних ґраток. Електрони, що досягли певної критичної швидкості, відщеплюють нові електрони, і стаціонарний стан порушується, тобто виникає ударна іонізація електронами у твердому тілі.

Чисто електричний пробій має місце, коли унеможливлений вплив електропровідності та діелектричних втрат, що обумовлюють нагрівання матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. Для однорідного поля і повної однорідності структури матеріалу напруженість поля при електричному пробі може служити мірою електричної міцності речовини. Такі умови вдається спостерігати для монокристалів лужно-галоїдних сполук і деяких органічних полімерів. У цьому випадку $E_{пр}$ досягає сотень мегавольт на метр і більше.

Для однорідних матеріалів спостерігається помітна різниця між значеннями пробивної напруги в однорідному і неоднорідному полях.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків. Він характерний для технічних діелектриків, що містять газові включення, і так само, як і електричний пробій однорідного діелектрика, дуже швидко розвивається.

Прийнято вважати, що в однорідному полі електрична міцність скла, порцеляни й інших твердих діелектриків не залежить від товщини зразка. Однак основні роботи з вивчення впливу ступеня однорідності на електричну міцність проводилися лише зі склом при дуже малій товщині зразків – від 0,05 до 0,2–0,5 мм, коли число дефектів невелике. Зі збільшенням товщини зразка підсилюється неоднорідність структури, зростає число газових включень і знижується електрична міцність як в однорідному полі, так і в неоднорідному. Іноді на досліді можна спостерігати, що електрична міцність кераміки при електродах, що створюють зовнішнє неоднорідне поле, буде навіть вища, ніж при електродах, що забезпечують однорідне поле. Електрична міцність твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її значення. Вище цього значення спостерігається помітне зниження електричної міцності, що говорить про появу механізму теплового пробою.

Електротепловий пробій. Він зводиться до розігріву матеріалу в електричному полі до температури, що відповідає хоча б місцевій втраті ним електроізоляційних властивостей, пов'язаній з надмірним зростанням наскрізної електропровідності або діелектричних втрат. Пробивна напруга

при тепловому пробої залежить від ряду факторів: частоти поля, умов охолодження, температури навколишнього середовища та інших. Крім того, напруга теплового пробою залежить від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики внаслідок малої нагрівостійкості, за інших рівних умов, мають більш низькі значення пробивних напруг при тепловому пробої, ніж неорганічні. При розрахунках напруги теплового пробою повинні братися до уваги значення $\text{tg}\delta$ діелектрика і його залежність від температури, а також діелектрична проникність матеріалу.

У колах змінного струму низької частоти знаходять застосування матеріали, що дають різке зростання $\text{tg}\delta$ уже при нагріванні вище 20 – 30 °С; з іншого боку, відомі діелектрики, значення $\text{tg}\delta$ яких мало змінюється в дуже широкому інтервалі температур, аж до 150 – 200 °С (в останньому випадку тепловий пробій зможе розвинути тільки при досягненні цих температур).

Температура нагрівання ізолятора в електричному полі високої напруги встановлюється тоді, коли тепловиділення виявиться рівним тепловіддачі в навколишнє середовище. У більшості випадків тепловідведення обумовлюється конвекцією повітря. Такі умови роботи підвісних і опорних ізоляторів, керамічних конденсаторів, каркасів котушок індуктивностей.

Тепловідведення за рахунок теплопровідності навколишнього середовища має місце для кабелів, вводів, вмонтованих у стіни. Звичайно при розрахунку ізоляторів вибирають таку робочу напругу, яка відповідає сталій температурі, щоб температура нагрівання не перевищувала деякого заданого значення, небезпечного з погляду нагрівостійкості діелектрика.

Тепловий пробій виникає у тому випадку, коли кількість теплоти, що виділяється в діелектрику за рахунок діелектричних втрат, перевищує кількість теплоти, яка може розсіюватися в даних умовах в навколишнє середовище. В цьому випадку порушується теплова рівновага, а процес набуває лавиноподібного характеру. Явище теплового пробою зводиться до розігрівання матеріалу в електричному полі до температур, відповідних розплавлення та обвуглювання.

Електрична міцність при тепловому пробої є характеристикою не тільки матеріалу, але і виробу з нього, тоді як електрична міцність при електричному пробої служить характеристикою самого матеріалу. Пробивна напруга, зумовлена нагрівом діелектрика, залежить від частоти напруги, умов охолодження, температури навколишнього середовища. Крім того, електротеплова пробивна напруга залежить від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики (наприклад, полістирол) мають нижчі значення електротеплових пробивних напруг, ніж неорганічні (кварц, кераміка) внаслідок їх малої нагрівостійкості.

Розглянемо методику спрощеного розрахунку пробивної напруги при тепловому пробої. Нехай пластинка однорідного діелектрика, що має

втрати, знаходиться між двома електродами, як показано на рис. 5.6.

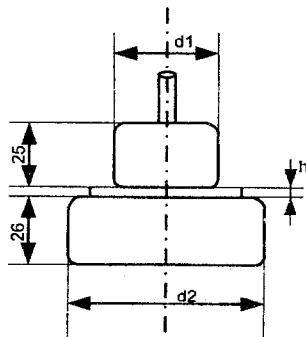


Рисунок 5.6 – Форма електродів для визначення електричної міцності твердих діелектриків

До електродів від достатньо потужного джерела змінного струму прикладається напруга, яка можна збільшуватись до пробивної. Механізм теплового пробою найбільш вірогідний при підвищених температурах, коли можна чекати, що переважними будуть втрати наскрізної електропровідності.

Температура t по всьому об'єму матеріалу, що знаходиться в електричному полі між електродами, однакова, якщо товщина діелектрика не дуже велика і теплопровідність його не дуже погана. Оскільки теплопровідність металу електродів, за рідкісним винятком, на два-три порядки більша, ніж теплопровідність діелектрика, вважається, що теплота з об'єму, що нагрівається, передається в навколишнє середовище через електроди. Потужність, що відводиться від діелектрика, виразимо за допомогою формули Ньютона:

$$P_T = 2 \cdot \sigma \cdot S \cdot (t - t_0), \quad (5.8)$$

де σ – коефіцієнт теплопередачі системи діелектрик-метал електродів.

Активна потужність P_a , яка виділяється в діелектриках за рахунок діелектричних втрат, залежить від температури, а форма її кривої визначається температурною залежністю $\operatorname{tg} \delta$ і визначається за формулою:

$$P_a = \frac{U^2 \cdot f \cdot \epsilon_r \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha \cdot (t - t_0)}}{1,8 \cdot 10^{10} \cdot h}, \quad (5.9)$$

де U – прикладена напруга;

f – частота;

ϵ_r – відносна діелектрична проникність;

$\operatorname{tg}\delta_0$ – тангенс кута діелектричних втрат діелектрика при температурі

навколишнього середовища;

α – температурний коефіцієнт тангенса кута діелектричних втрат;

t – температура нагрітого за рахунок діелектричних втрат матеріалу;

t_0 – температура електродів, яка приблизно дорівнює температурі навколишнього середовища;

S – площа електрода;

h – товщина діелектрика.

Для наочності подальших міркувань скористаємося графічною побудовою, показаною на рис. 5.7, де у вибраній системі координат зображені експоненти тепловиділення $P_a = F(t)$ при різних значеннях прикладеної напруги і пряма тепловіддачі $P_r = \varphi(t)$.

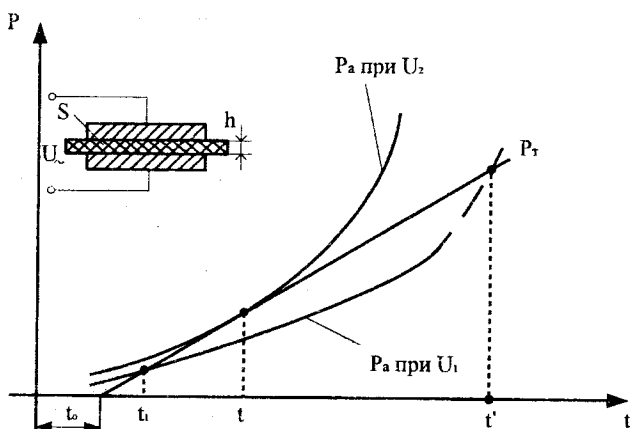


Рисунок 5.7 – Пояснення до розрахунку пробивної напруги при тепловому пробі

При значенні прикладеної напруги U_1 пряма теплопередачі P_r є січною прямою тепловиділення. При температурі t_1 настає стан стійкої теплової рівноваги, оскільки потужність тепловиділення дорівнює потужності, що відводиться від зразка. Якщо температура не перевищує значення t' , то потужність, що відводиться, буде більшою потужності тепловиділення, і зразок поступово буде повертатися в стійкий стан при температурі t_1 . Напруга U_1 буде безпечною для зразка діелектрика в даних умовах, якщо нагрів до температури t' не призведе до механічного або хімічного руйнування структури матеріалу. При збільшенні напруги до значення U_2 , при якому пряма теплопередачі є дотичною до кривої тепловиділення, буде нестійка тепла рівновага при температурі t . Таким чином, напруга,

при якій має місце нестійкий граничний режим, може бути прийнята за напругу теплового пробою $U_{пр}$. Її можна визначити за двох умов:

$$P_a = P_T; \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial t} = \frac{\partial P_T}{\partial t}. \quad (5.11)$$

Умова може бути записана тільки для одного граничного режиму. Дана умова справедлива для всіх випадків стійкої роботи діелектрика під напругою. Використовуючи попередні формули, одержуємо:

$$\frac{U^2 \cdot f \cdot \epsilon_r \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}}{1,8 \cdot 10^{10} \cdot h} = 2 \cdot \sigma \cdot S \cdot (t - t_0); \quad (5.12)$$

$$\frac{\alpha \cdot U^2 \cdot f \cdot \epsilon_r \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha(t-t_0)}}{1,8 \cdot 10^{10} \cdot h} = 2 \cdot \sigma \cdot S. \quad (5.13)$$

Розділивши вираз (5.12) на (5.13), одержуємо :

$$\frac{1}{\alpha} = t - t_0. \quad (5.14)$$

Підставляючи (5.14) в (5.13) і розв'язуючи одержане рівняння щодо U , визначаємо величину $U_{пр}$:

$$U_{пр} = K \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot h}{f \cdot \epsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \cdot \alpha}}, \quad (5.15)$$

де K – числовий коефіцієнт, рівний $115 \div 105$, якщо всі величини, що мають розмірності, виражені в одиницях системи СІ.

Одержаний вираз показує, що напруга теплового пробою буде вищою, якщо умови тепловіддачі кращі (σ більше), діелектрик товстіший, і меншою – при високих частотах, при збільшених значеннях коефіцієнтів діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta_0$, діелектричної проникності ϵ , і великому температурному коефіцієнтові тангенса кута діелектричних втрат α .

У загальному випадку тепловий пробій – складніше явище, ніж було розглянуто. По товщині діелектрика має місце перепад температури, середній шар виявляється нагрітим більше, ніж прилеглі до електродів, опір першого різко падає, що веде до спотворення електричного поля і підвищених градієнтів напруги в поверхневих шарах. Впливає також і теплопровідність матеріалу електродів. Все це сприяє пробою зразків при нижчих напругах, ніж одержані з наближеного розрахунку.

Залежність електричної міцності від різних факторів змушує визначати електричну міцність при нормованих умовах випробувань (від напруги, швидкості її підйому, площі, форми електродів і відстані між ними, числа зразків, температури і вологості навколишнього середовища). Оскільки реальні умови роботи матеріалів здебільшого відрізняються від умов, у яких проводяться випробування, отримані результати можуть бути використані при розрахунках електроізоляційних конструкцій тільки після введення відповідних поправочних коефіцієнтів.

Два електроди можуть знаходитися на поверхні діелектрика. У цьому випадку при перекритті відбувається порушення електричної міцності повітря, а характеристики діелектрика (діелектрична проникність, поверхневий і об'ємний опори, товщина діелектрика) впливають на значення напруженості перекриття, що, як правило, значно нижча напруженості пробою по товщині.

Електрохімічний пробій. Цей вид пробою ізоляційних матеріалів має особливо істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Він спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли в матеріалі розвиваються електролітичні процеси, які обумовлюють незворотне зменшення опору ізоляції.

Таке явище часте називають також старінням діелектрика в електричному полі, оскільки воно веде до поступового зниження електричної міцності. Електрохімічний пробій вимагає для свого розвитку тривалого часу тому, що він пов'язаний з явищами електропровідності, які приводить до повільного виділення в матеріалі малих кількостей хімічно активних речовин, або з утворенням напівпровідних з'єднань. У кераміці, що містить окисли металів змінної валентності (наприклад, TiO_2), електрохімічний пробій зустрічається значно частіше, ніж у кераміці, що складається з окислів алюмінію, кремнію, магнію, барію.

5.4 Контрольні питання

1. Пробій газів.
2. Пробій рідких діелектриків.
3. Види пробою твердих діелектриків.
4. Коли в електроізоляційних матеріалах настає тепловий пробій?
5. Коли в електроізоляційних матеріалах настає іонізаційний пробій?
6. Коли в електроізоляційних матеріалах настає електрохімічний пробій?
7. Від чого залежить електрична міцність електроізоляційних матеріалів?
8. Наведіть приклади використання залежності електричної міцності від тиску в електроустановках.

6 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

При виборі ЕТМ для використання необхідно звертати увагу не лише на його електричні властивості в нормальних умовах експлуатації, але й розглядати також їх стабільність при дії вологості, температури навколишнього середовища, радіоактивних опроміненнь тощо.

Крім того, нормальне використання різних виробів залежить і від механічних властивостей використовуваних в них ЕТМ.

6.1 Вологісні властивості діелектриків

ЕТМ в більшій або меншій мірі гігроскопічні, тобто мають здатність вбирати в себе вологу з навколишнього середовища, і вологопроникні, тобто здатні пропускати крізь себе пари води. Атмосферне повітря завжди містить деяку кількість водяної пари.

Абсолютну вологість повітря оцінюють масою m водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря (у одному кубічному метрі). Кожній температурі відповідає певне значення абсолютної вологості при насиченні $m_{\text{нас}}$. Більшу кількість води повітря містити не може і вона випадає у вигляді роси. Абсолютна вологість різко зростає зі збільшенням температури, тобто росте і тиск водяної пари. Відносну вологість повітря визначають у відсотках з відношення:

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{нас}}} \cdot 100 = \frac{P}{P_{\text{нас}}} \cdot 100 \% . \quad (6.1)$$

Абсолютній вологості повітря (при нормальному атмосферному тиску) відповідають різні значення відносної вологості φ (рис. 6.1). Верхня крива відповідає повітрю, повністю насиченому водяною паром. При температурі 20 °С і нормальному атмосферному тиску 0,1 МПа значення $m_{\text{нас}}$ складає 17,3 г/м³.

За нормальну вологість повітря (для різних випробувань, для визначення властивостей гігроскопічних матеріалів в стандартних умовах зволоження) приймають відносну вологість повітря $\varphi = 65\%$. В повітрі з нормальною вологістю при 20 °С вміст водяної пари $m = 17,3 \cdot 0,65 = 11,25$ г/м³. Вода є сильно полярним діелектриком з низьким питомим опором, біля $10^3 - 10^4$ Ом·м, а тому потрапляння її в пори твердих діелектриків веде до різкого зниження їх електричних властивостей. Особливо помітна дія вологості при підвищених температурах (30–40 °С) і високих значеннях φ близьких до 98–100%.

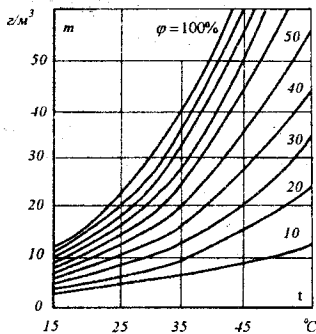


Рисунок 6.1 – Абсолютна вологість повітря при нормальному атмосферному тиску і різних значеннях відносної вологості у функції температури t

Подібні умови спостерігаються в країнах з вологим тропічним кліматом, причому в період дощів вони можуть зберігатися протягом тривалого періоду часу, що несприятливо позначається на роботі електричних машин і апаратів. В першу чергу, дія підвищеної вологості повітря відображається на поверхневому опорі діелектриків. Для оберігання поверхні електроізоляційних деталей, виконаних з полярних твердих діелектриків, від дії вологості їх покривають лаками, які не змочуються водою. Здатність діелектриків змочуватися водою (або іншою рідиною) характеризується краєвим кутом змочування θ краплі води, нанесеної на плоску поверхню тіла. Чим менше θ , тим сильніше змочування; для змочуваних поверхонь $\theta < 90^\circ$ (рис. 6.2, а), для гірше змочуваних $\theta > 90^\circ$ (рис. 6.2, б). За наявності в діелектрику об'ємної відкритої пористості або при нещільній структурі волога потрапляє всередину матеріалу.

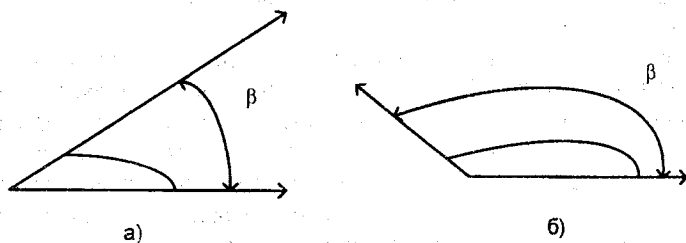


Рисунок 6.2 – Крапля рідини на змочуваній поверхні діелектрика (а) і на гірше змочуваній поверхні (б)

Зразок електроізоляційного матеріалу, поміщений в середовище з певною вологістю і температурою, через необмежено великий час досягає стану з рівноважною вологістю. Якщо порівняно сухий зразок матеріалу помістити у вологе повітря з відносною вологістю ϕ , то спостерігатиметься поступове поглинання матеріалом води з повітря, причому вологість матеріалу ψ , тобто вміст води в одиниці маси матеріалу, протягом часу τ підвищуватиметься, асимптотично наближаючись до рівноважної вологості ψ_p , відповідної даному значенню ϕ (рис. 6.3, крива 1). Навпаки, якщо в повітрі тієї ж відносної вологості ϕ буде поміщений зразок з того ж матеріалу з початковою вологістю, більшою ψ_p , то вологість зразка зменшуватиметься, асимптотично наближаючись до рівноважної вологості ψ_p ; в цьому випадку відбувається сушіння матеріалу (крива 2). Для різних матеріалів значення рівноважної вологості при одному і тому ж значенні відносної вологості повітря ϕ можуть бути вельми різні.

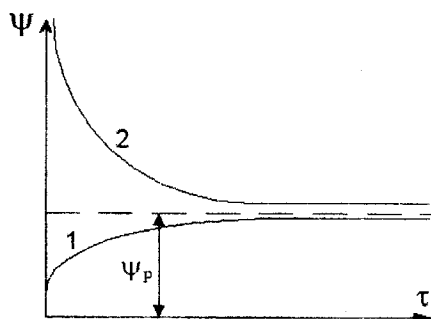


Рисунок 6.3 – Зміна вологості ψ зразка матеріалу при зволоженні (крива 1) і сушінні (крива 2) для постійних значень відносної вологості навколишнього повітря і температури

Визначення вологості електроізоляційних матеріалів важливе для уточнення умов, при яких проводиться випробування електричних властивостей даного матеріалу. Для текстильних матеріалів встановлюється так звана кондиційна вологість, відповідна рівноважній вологості матеріалу при знаходженні його в повітрі в нормальних умовах. Так, для кабельного паперу кондиційна вологість приймається рівною 8%. На гігроскопічність матеріалу істотний вплив чинить його будова, наявність і розмір капілярних проміжків всередині матеріалу, в які проникає вода. Сильно пористі матеріали, зокрема волоконні, більш гігроскопічні, ніж матеріали щільної будови. Наведемо орієнтовні розміри пор (у нанометрах), які зустрічаються в різних електроізоляційних матеріалах: мікропори в кераміці 10^3 – 10^6 , капіляри у волокнах целюлози 1000, пори в стінках волокна 10–100, міжмолекулярні пори різних матеріалів 10–50, внутрішньомолекулярні пори менше 10. Для порівняння,

ефективний діаметр молекули води дорівнює приблизно 0,27 нм, тому маленькі за розмірами молекули води можуть проникати навіть у внутрішньомолекулярні пори целюлозних електроізоляційних матеріалів. Якщо ж волога розподіляється за об'ємом матеріалу у вигляді окремих, не з'єднаних між собою малих включень, то вплив вологи на електричні властивості матеріалу менш істотний.

Найпомітніше зниження питомого об'ємного опору під впливом вологості спостерігається у пористих матеріалах, що містять розчинні у воді домішки, які створюють електроліти з високою питомою провідністю. Для подібних матеріалів залежність ρ вологого зразка від температури наведена на рис. 6.4.

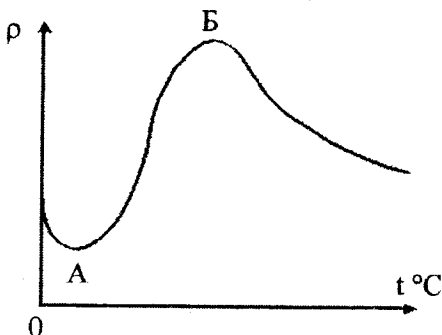


Рисунок 6.4 – Залежність від температури питомого об'ємного опору вологого зразка матеріалу, що містить електролітичні домішки

При нагріванні вологого зразка ρ спочатку падає за рахунок збільшення ступеня дисоціації домішок у водному розчині (до А), потім йде видалення вологи – сушіння (ділянка АБ) і лише при вищих температурах спостерігається зниження ρ . При змінній напрузі найчутливішим параметром пористих діелектриків є $\text{tg } \delta$, що помітно зростає зі зволоженням матеріалу. Менш чутлива величина ϵ_r , проте і вона, як правило, збільшується з поглинанням вологи, зважаючи на велике значення діелектричної проникності води в порівнянні з іншими діелектриками (для води $\epsilon_r \approx 80$). Тому у ряді випадків гігроскопічність матеріалу оцінюють за збільшенням електричної ємності зразка під дією вологості.

Окрім гігроскопічності велике практичне значення має вологопроникність електроізоляційних матеріалів, тобто здатність їх пропускати крізь себе пари води. Ця характеристика надзвичайно важлива для оцінювання якості матеріалів, що використовуються для захисних покривів (оболонки кабелів, опресовування конденсаторів, заливки компаундів, лакові покриття деталей). Тільки у скла, добре обпаленої кераміки і металів вологопроникність практично дорівнює нулеві.

Кількість вологи m (кг), що проходить за час τ (с) крізь поверхню S (м^2) шару ізоляційного матеріалу товщиною h (м) під дією різниці тиску водних парів p_1 і p_2 (Па) з двох сторін шару матеріалу визначається за формулою:

$$m = \Pi \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot S}{h} \cdot \tau, \quad (6.2)$$

де Π – коефіцієнт вологопроникності і залежить від матеріалу.

Для зменшення гігроскопічності і вологопроникності пористих ізоляційних матеріалів широко застосовується їх просочення. Необхідно мати на увазі, що просочення целюлозних волоконних матеріалів й інших органічних діелектриків лише уповільнює зволоження матеріалу, не впливаючи на питомий об'ємний опір після тривалої дії вологості. Це пояснюється тим, що молекули просочувальних речовин, що мають досить великі розміри в порівнянні з розмірами молекул води, не в змозі створити повну непроникність вологи в пори матеріалу.

При тривалому використанні електроапаратури, особливо в тропічних умовах, на органічних діелектриках розвивається цвіль. Поява цвілі зменшує питомий поверхневий опір діелектриків, призводить до зростання втрат, пониження механічної міцності ізоляції та викликає корозію дотичних до неї металевих частин. Цвіль розвивається найчастіше в каніфолі, масляних лаках, целюлозних матеріалах, у тому числі і в просочених (гетинакс, текстоліт). Найстійкішими до утворення цвілі є неорганічні діелектрики; кераміка, скло, слюда, кремнійорганічні матеріали і деякі органічні, наприклад, епоксидні смоли, фторопласт-4, поліетилен, полістирол. У тропіках доводиться зважати на небезпеку пошкодження електричної ізоляції, кабельних оболонок комахами (термітами) і тваринами. Випробовуючи на тропікостійкість, електроізоляційні матеріали і різні електротехнічні вироби тривало витримують при температурі 40–50 °С в повітрі, насиченому парами води, і при дії цвілевих грибків (точні умови цих випробувань встановлені Міжнародною електротехнічною комісією). Далі визначається ступінь погіршення електричних й інших властивостей досліджуваних зразків і встановлюється інтенсивність зростання цвілі на них. З метою поліпшення цвілестійкості органічної електричної ізоляції в її склад вводять домішки фунгіцидів, тобто речовин, отруйних для цвілевих грибків і таких, що затримують їх розвиток, або покривають ізоляцію лаками, які містять фунгіциди.

6.2 Основні механічні властивості діелектриків

Електроізоляційні матеріали, з яких виготовлені елементи конструкцій, піддаються впливу механічних навантажень, і тому практичне значення

має механічна міцність цих матеріалів а також їхня здатність не деформуватися від механічних напруг.

Міцність на розрив, стиск і вигин. Ці найпростіші види статичних механічних навантажень – розтягувальних, стискальних і згинальних – вивчаються на підставі елементарних закономірностей, відомих з курсу опору матеріалів.

Значення меж міцності при розтягуванні (σ_p), стиску (σ_c) і згині (σ_z) у системі одиниць СІ виражаються в Паскалях (Н/м^2). Для електроізоляційних матеріалів анізотропної будови (шаруватих, волокнистих) значення механічної міцності сильно залежить від напрямку прикладення навантаження. Важливо відзначити, що для ряду діелектриків (скла, керамічних матеріалів, багатьох пластмас та ін.) межа міцності при стиску значно більша, ніж при розриві і згині. Так, наприклад, у кварцевого скла при стискальних напругах можна одержати $\sigma_c = 200$ МПа, а при розтягуванні σ_p – до 50 МПа.

Механічна міцність ряду діелектриків сильно залежить від площі поперечного перерізу виробів і від температури.

Велике практичне значення мають крихкість, твердість і деякі інші механічні характеристики електроізоляційних матеріалів.

Крихкість. Багато матеріалів тендітні, тобто, маючи порівняно високу міцність стосовно статичних навантажень, у той же час легко руйнуються динамічними (раптово прикладеними) зусиллями.

У ряді випадків перевіряють здатність електроізоляційних матеріалів витримувати без руйнування тривалий вплив вібрацій, тобто повторних коливань певної частоти й амплітуди.

Твердість. Твердість, тобто здатність поверхневого шару матеріалу протистояти деформації від стискального зусилля, переданого за допомогою предмета малих розмірів, має для діелектриків менш істотне значення і визначається різними методами: для неорганічних матеріалів – за мінералогічною шкалою Мооса, для органічних діелектриків – за способом Бринеля або за допомогою маятника Кузнецова.

В'язкість. Для рідких і напіврідких електроізоляційних матеріалів, олій, лаків, заливальних і просочувальних компаундів важливою механічною характеристикою є в'язкість. Динамічна в'язкість, або коефіцієнт внутрішнього тертя, рідини являє собою величину, що входить у цілий ряд законів гідродинаміки в'язких середовищ, а саме в закон Пуазейля – витікання в'язких рідин через капілярні трубки, у закон Стокса – рух кульки в в'язкому середовищі під дією невеликої постійної сили.

Закон зміни в'язкості від температури відповідає рівнянню експоненти:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{W}{k \cdot T}}, \quad (6.3)$$

де A – постійна, що характеризує дану рідину;

W – енергія активації (дорівнює роботі переходу молекули з одного стійкого стану в інший);

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Кінематична в'язкість ν дорівнює відношенню динамічної в'язкості рідини до її густини:

$$\gamma = \frac{\eta}{\rho} \gamma. \quad (6.4)$$

У системі СІ кінематична в'язкість вимірюється в м²/с, В'язкість усіх речовин, які не піддаються при нагріванні хімічним змінам, сильно зменшується з підвищенням температури.

6.3 Теплові властивості діелектриків

До найважливіших теплових властивостей діелектриків відносять:

- нагрівостійкість.
- холодостійкість.
- теплопровідність.
- теплове розширення діелектриків.

Нагрівостійкість. Це здатність електроізоляційних матеріалів без пошкоджень витримувати дію високої напруги. Нагрівостійкість оцінюється відповідними значеннями температури, при яких ЕТМ може виконувати свої функції впродовж всього терміну служби. ГОСТ 8865-70 передбачає розділення електроізоляційних матеріалів для електричних машин, трансформаторів на класи нагрівостійкості, для яких визначаються найбільші допустимі робочі температури, при яких за нормальних умов роботи властивості діелектриків не змінюються протягом тривалого часу. В табл. 6.1 наведені класи нагрівостійкості.

Таблиця 6.1 – Класи нагрівостійкості діелектриків

Клас нагрівостійкості	У	А	Е	В	F	Н	С
Найбільш допустима робоча температура, °С	90	105	120	130	155	180	Більше 180

За умови використання діелектрика протягом нетривалого часу вказані температури можна дещо збільшити.

До класу У відносять не просочені рідким електроізоляційним матеріалом волокнисті матеріали на основі целюлози і тканини (шовк, бавовна, папір, картон).

До класу А відносять просочені ті ж самі волокнисті матеріали.

До класу Е належать пластичні маси з органічним наповнювачем і термореактивні сполуки типу фенолформальдегідних і подібним їм смол

(гетинакс, текстоліт та інші), поліетилентерефталатні плівки, епоксидні, поліефірні і поліуретанові смоли і компаунди, ізоляція емальованих проводів на поліуретанових і епоксидних лаках. Таким чином, до класів нагрівостійкості Y, A и E відносять, головним чином, чисто органічні електроізоляційні матеріали.

До класу **В** входять матеріали, для яких характерний великий вміст неорганічних компонентів, наприклад шіпана слода, азбестові і скловолокнисті матеріали з органічними в'язучими, лакотканини, текстоліти на фенолформальдегідних термореактивних смолах, епоксидні компаунди з неорганічними наповнювачами.

До класу **Г** належать міканіти, вироби на основі скловолокна без підкладки або з неорганічною підкладкою, із застосуванням органічних в'язучих підвищеної нагрівостійкості (епоксидних, термореактивних поліефірних, кремнійорганічних).

Матеріали класу **Н** отримують з використанням кремнійорганічних смол особливо високої нагрівостійкості.

До класу **С** відносять чисто неорганічні матеріали. Це слода, скло і скловолокнисті матеріали, кварц, азбест, мікалекс, нагрівостійкі міканіти. З усіх органічних електроізоляційних матеріалів до класу нагрівостійкості **С** належать тільки політетрафторетилен (фторопласт-4) і матеріали на основі поліамідів (плівки, волокна, ізоляція емальованих проводів).

Питання про віднесення того чи іншого електроізоляційного матеріалу або комбінації електроізоляційних матеріалів до певного класу нагрівостійкості вимагає тривалих і трудомістких випробувань зразків матеріалів на теплове старіння в умовах, найбільш схожих до тих умов, у яких ці матеріали будуть знаходитися в експлуатації. Для ряду електроізоляційних матеріалів досить важлива стійкість стосовно різних змін температури, у результаті яких в матеріалі можуть утворюватися тріщини.

У результаті випробувань встановлюється стійкість матеріалу до теплових впливів, причому вона в різних випадках може бути неоднаковою: наприклад, матеріал, що витримує короточасне нагрівання до деякої температури, може виявитися нестійким стосовно теплового старіння при тривалому впливі навіть більш низької температури.

Якщо погіршення якості ізоляції може виявитися при тривалому впливі підвищеної температури внаслідок повільних хімічних процесів, то це явище називають тепловим старінням ізоляції. Для перевірки стійкості електроізоляційних матеріалів до теплового старіння зразки цих матеріалів довгостроково витримують при порівняно невисокій температурі, що не викликає негайного руйнування матеріалу. Властивості зразків, що старіли певний час, порівнюють із властивостями початкового матеріалу. При інших рівних умовах швидкість теплового старіння органічних і елементоорганічних полімерів значно зростає з підвищенням температури старіння, підкоряючись загальним закономірностям температурної зміни

швидкості хімічних реакцій. Тривалість старіння τ пов'язана з абсолютною температурою старіння T залежністю вигляду:

$$\ln \tau = \frac{A}{T} + B, \quad (6.5)$$

де A и B – величини, постійні для даного матеріалу і даних умов старіння.

Таким чином, залежність τ (у логарифмічному масштабі) від величини, оберненої абсолютній температурі старіння, повинна мати вигляд прямої лінії (рис. 6.5).

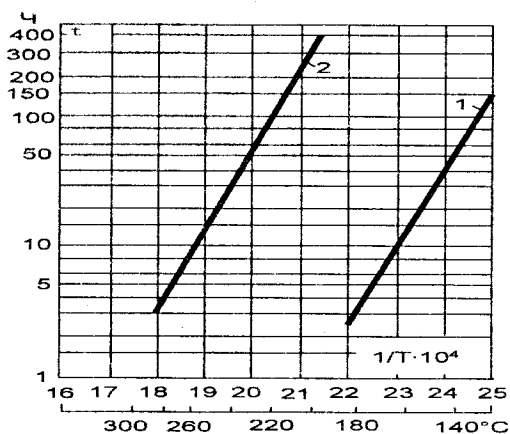


Рисунок 6.5 – Тривалість старіння τ плівок до появи тріщин при вигині у функції температури масляно-бітумного (1) і кремнійорганічного (2) лаків

У більшості випадків нахил цих прямих такий, що зменшує τ удвічі і відповідає підвищенню температури старіння в середньому на 10 К. Аналогічні залежності спостерігаються для терміну служби ізоляції електричних машин й інших електроізоляційних конструкцій.

Крім температури на швидкість старіння впливає зміна тиску повітря або його концентрація, присутність озону, а також різних хімічних реагентів, що прискорюють або сповільнюють старіння.

Холодостійкість. Це здатність ізоляції виконувати свої функції без погіршення експлуатаційної надійності при низьких температурах від -60 до -70 °С, оскільки деякі еластичні матеріали при низьких температурах стають крихкими, що викликає відповідні труднощі при роботі з ізоляцією. Тому дослідження електроізоляційних матеріалів на холодостійкість часто проводять одночасно з дією вібрацій.

Теплопровідність. Практичне значення теплопровідності пояснюється тим, що тепло, яке виділяється внаслідок втрат потужності в оточених електричною ізоляцією провідниках і магнітному осердді, а також внаслідок діелектричних втрат в ізоляції, переходить у навколишнє середовище. Теплопровідність впливає на електричну міцність при тепловому пробіі і на стійкість матеріалу до теплових імпульсів. Теплопровідність матеріалів характеризують теплопровідністю γ_T , що входить у рівняння Фур'є:

$$\Delta P_T = \gamma_T \frac{dT}{dl} \Delta S, \quad (6.6)$$

де ΔP_T – потужність теплового потоку крізь площадку ΔS , нормальну до потоку;

$\frac{dT}{dl}$ – градієнт температури.

Значення γ_T електроізоляційних матеріалів за винятком окису берилію менше, ніж більшості металів. Найменші значеннями γ_T мають пористі електроізоляційні матеріали з повітряними включеннями. При просоченні, а також при ущільненні матеріалів зовнішнім тиском γ_T збільшується. Як правило, кристалічні діелектрики мають більш високі значення γ_T , ніж аморфні. Величина γ_T мало залежить від температури.

Теплове розширення діелектриків. Його, як і інших матеріалів, оцінюють температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР), який вимірюється у K^{-1} :

$$\alpha_1 = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt}. \quad (6.7)$$

Матеріали, для яких характерні малі значеннями ТКЛР, мають, як правило, найбільш високу нагрівостійкість і навпаки.

Органічні діелектрики мають підвищене значення ТКЛР в порівнянні з неорганічними діелектриками. Тому деталі, виготовлені з неорганічних матеріалів, мають підвищену стабільність розмірів при коливаннях температури.

6.4 Контрольні питання

1. Вологісні характеристики діелектриків.
2. Основні механічні властивості діелектриків.
3. Теплові властивості діелектриків.
4. Класи нагрівостійкості діелектриків.
5. Старіння електроізоляційних матеріалів.

7.1 Електропровідність напівпровідників

Електропровідність напівпровідників залежить від напруженості електричного поля. При низьких значеннях напруженості до деякого критичного значення E_k виконується закон Ома і питома провідність не залежить від напруженості поля, а при більш високих напруженостях поля починається інтенсивне зростання питомої провідності за експонентним законом, що приводить до руйнування структури напівпровідника. З ростом температури питома провідність збільшується. Для ряду напівпровідників залежність питомої провідності від напруженості поля описується виразом:

$$\gamma_E = \gamma \cdot e^{\beta \cdot \sqrt{E}}, \quad (7.1)$$

де γ – питома провідність напівпровідника при $E < E_k$;

β – коефіцієнт, що характеризує властивості напівпровідника.

Зростання провідності зумовлене ростом числа носіїв заряду. При подальшому зростанні поля може з'явитися механізм ударної іонізації, що приводить до руйнування структури напівпровідника.

Найбільш важливі технічні застосування напівпровідників засновані на створенні в одному матеріалі контактувальних областей з різними типами електропровідності – (p-n-переходів), з однією електропровідністю, але різної величини (n-n+ або p-p+), а також контактів метал-напівпровідник, метал-діелектрик-напівпровідник і т. д. Для найбільш широко використовуваних напівпровідників ширина забороненої зони складає від 0,5 до 2,5 еВ.

7.1.1 Власний напівпровідник

На рисунку 7.1, а наведена енергетична діаграма власного напівпровідника, тобто такого, у якого електрони в зону вільних енергетичних рівнів можуть переходити лише із заповненої електронами зони. Розподіл електронів по рівнях енергії, зображений на рисунку 7.1, а, відповідає деякій температурі T , при якій у зону провідності перейшло декілька електронів, утворивши у валентній зоні відповідне число дірок.

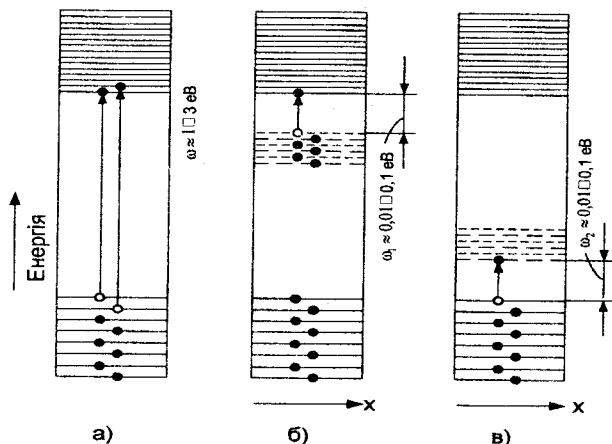


Рисунок 7.1 – Вплив домішок на енергетичну діаграму напівпровідників

- а) для власного напівпровідника, б) для напівпровідників з донорною домішкою електронної електропровідності (n-типу), в) для напівпровідників з акцепторною домішкою діркової електропровідності (p-типу)

Оскільки при кожному порушенні рівноважного стану у власному напівпровіднику одночасно створюються два заряди протилежних знаків, то загальна кількість носіїв заряду буде в два рази більша числа електронів у зоні провідності, тобто:

$$n_{0i} = p_{0i}, \quad n_{0i} + p_{0i} = 2n_{0i}, \quad (7.2)$$

де індекс i (в концентрації електронів і дірок) означає, що це власні носії зарядів.

У розглянутому випадку питома провідність:

$$\gamma = e \cdot n_{0i} \cdot u_n + e \cdot p_{0i} \cdot u_p, \quad (7.3)$$

де u_n, u_p – рухливість, відповідно, електронів і дірок.

В результаті процесів збудження і рекомбінації при будь-якій температурі тіла встановлюється рівноважна концентрація збуджених носіїв:

електронів

$$n_{0i} = 2 \cdot N_c \cdot e^{-\frac{\Delta\omega}{2 \cdot k \cdot T}}, \quad (7.4)$$

або дірок

$$p_{0i} = 2 \cdot N_B \cdot e^{\frac{\Delta\omega}{2 \cdot k \cdot T}}, \quad (7.5)$$

де $\Delta\omega$ – ширина забороненої зони напівпровідника;

N_C – число енергетичних рівнів в одиниці об'єму напівпровідника у вільній зоні (зоні провідності);

N_B – те ж у валентній зоні.

Коефіцієнт 2 показує, що на кожному рівні можуть знаходитися два електрони.

Рухливості електронів u_n і дірок u_p неоднакові. Електрони і дірки мають різну інертність при русі в кристалічних ґратках напівпровідника, тобто відрізняються один від одного ефективними масами m_n^* і m_p^* . У більшості випадків $m_n^* < m_p^*$. Звідки, власна електропровідність напівпровідників має переважно слабо виражений електронний характер.

7.1.2 Домішкові напівпровідники

Для більшості напівпровідникових приладів використовуються домішкові напівпровідники. Тому в практиці важливе значення мають такі напівпровідникові матеріали, у яких відчутна концентрація власних носіїв заряду, тобто напівпровідники з досить широкою забороненою зоною.

У робочому інтервалі температур постачальниками вільних носіїв заряду є домішки. Домішками в простих напівпровідниках служать іншорідні атоми. Під домішками в напівпровідникових хімічних сполуках розуміють не тільки включення атомів чужорідних елементів, але й надлишкові за стехіометричним складом атоми тих самих елементів, що входять у хімічну формулу самої сполуки. Крім того, роль домішок відіграють усілякі дефекти кристалічних ґраток: порожні вузли, атоми або іони в міжвузлових ґратках, дислокації або зрушення, що виникають при пластичній деформації кристалів, мікротріщини та інші. Якщо домішкові атоми знаходяться у вузлах кристалічних ґраток, то вони називаються домішками заміщеннями, а якщо між вузлами – домішками впровадження.

Донори й акцептори – це домішки, атоми яких створюють дискретні енергетичні рівні в межах забороненої зони напівпровідника. При невеликій концентрації домішок їхні атоми розташовані в ґратках напівпровідника на таких великих відстанях один від одного, що вони не взаємодіють, а тому енергетичні рівні їх майже такі ж, як в окремому вільному атомі. Ймовірність безпосереднього переходу електронів з одного домішкового атома до іншого мізерно мала. Однак домішки можуть або поставляти електрони в зону провідності напівпровідника, або

приймати їх з рівнів його валентної зони.

Донори. Заповнені при відсутності зовнішніх енергетичних впливів (тепло, світло) домішкові рівні розташовані в забороненій зоні біля «дна» зони провідності (див. рис. 7.1, б). При цьому енергія активації домішкових атомів менша, ніж ширина забороненої зони основного напівпровідника, а тому при нагріванні тіла перекидання електронів домішок буде випереджати збудження електронів ґратки. Позитивні заряди, що виникли у віддалених один від одного домішкових атомах (див. рис. 7.1, б) (рівні домішок показані з розривами), залишаються локалізованими, тобто не можуть переміщуватись по кристалу і брати участь в електропровідності. Напівпровідник з такою домішкою має концентрацію електронів, більшу, ніж концентрація дірок, що з'явилися за рахунок переходу електронів з валентної зони в зону провідності, і його називають напівпровідником n-типу, а домішки, що поставляють електрони в зону провідності – донорами.

Акцептори. Інші домішки можуть внести незаповнені рівні, що розташовуються в забороненій зоні основного напівпровідника у верхній частині валентної зони. Теплове порушення буде в першу чергу перекидати електрони з валентної зони на ці вільні домішкові рівні. Через роз'єднаність атомів домішки електрони, закинуті на домішкові рівні, не беруть участь в електричному струмі. Такий напівпровідник буде мати концентрацію дірок більшу, ніж концентрація електронів, що перейшли з валентної зони в зону провідності, і його відносять до р-типу. Домішки, що захоплюють електрони з валентної зони напівпровідника, називаються акцепторами (див. рис. 7.1, в).

Для просторових структур, які визначають види електропровідності напівпровідників, важливу роль відіграють домішки заміщення.

Ковалентні структури типу алмаза. Германій, кремній – елементи IV групи таблиці Менделєєва мають структуру алмаза, в якій кожний атом знаходиться між чотирма сусідніми (рис. 7.2, а). В такій структурі діють ковалентні зв'язки. Валентні електрони закріплені за своїми атомами і не переміщуються по кристалу. Якщо на місце одного з атомів потрапить сторонній атом іншої хімічної природи, то система валентних зв'язків буде порушена. В цьому випадку може бути два випадки. На рис. 7.2, б наведена кристалічна ґратка германію з домішкою миш'яку (V група), на зовнішній орбіті якого знаходиться п'ять електронів. Потрапивши в вузол германія і зв'язавши чотири зі своїх електронів, така домішка дає слабо зв'язаний електрон 1, який дрейфує по кристалу, а під дією електричного поля направлено рухається (з'являється електропровідність типу n). Атом домішки (миш'яку), що втратив електрон, є додатно зарядженим і нерушливо закріпленим в ґратці напівпровідника. Така домішка буде донором.

На рис. 7.2, в наведена кристалічна ґратка германія з домішкою елемента III групи – індію, що має три валентних електрони. Така домішка

в ґратці германія утворює дірку. Індій може взяти електрон у сусіднього атому германія і буде від'ємно зарядженим, нерухливим і закріпленим в ґратці напівпровідника, а дірка почне дрейфувати по кристалу. Під дією електричного поля E дірка рухається направлено відносно поля (електропровідність типу - p), домішка в цьому випадку є акцептором.

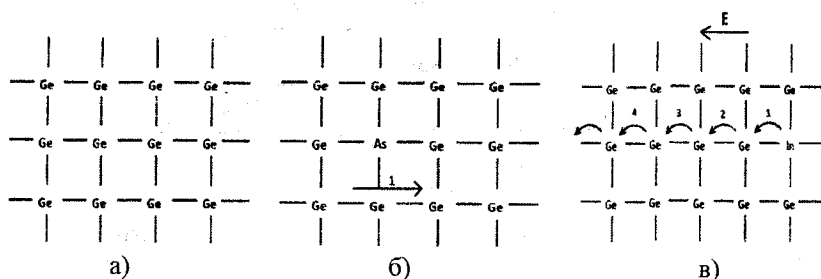


Рисунок 7.2 – Схематичне зображення кристалічної ґратки германія:
а) без домішок; б) з акцепторною домішкою індій; в) з донорною домішкою миш'яка

Ковалентні напівпровідникові з'єднання. У напівпровідникових з'єднаннях АІІ BV (In, Sb, Ga, As та ін.) домішкові атоми заміщення ІІ групи (Mg, Zn та ін.) мають меншу валентність і є акцепторами, а домішкові атоми ІV групи (Se, Te), які мають більшу валентність, – донорами. Домішкові атоми у напівпровідникових з'єднаннях АІІІ BV можуть бути донорами, якщо заміщають тривалентні атоми у ґратці, і можуть бути акцепторами, якщо заміщають п'ятивалентні атоми.

Напівпровідники з іонними ґратками (CdS, PbS оксиди). В них спостерігається закономірність. Якщо напівпровідник має електропровідність p і r-типів, як у PbS, то надлишок сірки чи кисню викликає у нього діркову електропровідність, а надлишок металу – електронну.

7.2 Вплив зовнішніх факторів на електропровідність напівпровідників

7.2.1 Вплив теплової енергії

Температурна залежність концентрації носіїв зарядів. В широкому діапазоні температур і для різного складу домішок має місце температурна залежність концентрації носіїв в напівпровідниках p-типу (рис. 7.3).

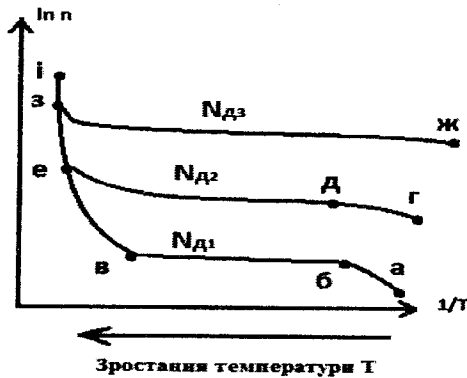


Рисунок 7.3 – Типові залежності концентрації носіїв заряду у напівпровіднику від температури при різних концентраціях донорних домішок ($N_{d1} < N_{d2} < N_{d3}$)

В області низьких температур частина нижньої кривої між точками а і б характеризує тільки концентрацію носіїв, обумовлену домішками. Нахил прямої визначається енергією активізації ω_{d1} . З збільшенням T росте кількість носіїв, що поставляються домішками. На ділянці (б, в) домішки вже виснажені, а переходу електронів через заборонену зону ще немає. Далі значення температури настільки стає великим, що електрони переходять через заборонену зону (в, і) – концентрація носіїв заряду швидко росте. Нахил цієї ділянки характеризує ширину забороненої зони напівпровідника – $\Delta\omega$. Зі збільшенням концентрації домішок у напівпровіднику перехід від ділянки (а, б) або (г, д), на якій концентрація носіїв обумовлена лише домішками, до ділянки виснажених домішок (б, в) або (д, е) зміщується в бік високих температур. Крива (ж, і) має дві ділянки: (ж, з) – постійна концентрація заряду до температури, при якій носії не переходять через заборонену зону; (з, і) – перехід носіїв через заборонену зону. Такий напівпровідник є виродженням.

Температурна залежність питомої провідності напівпровідників. У напівпровідниках з атомними ґратками (а також в іонних кристалах при підвищених температурах) рухливість змінюється при зміні температури порівняно слабо (за статичним законом), а концентрація – дуже сильно (за експонентним законом). Тому температурна залежність питомої провідності схожа на температурну залежність концентрації носіїв, обумовлених домішками (рис. 7.4). У зоні виснаження електронних ресурсів домішкових атомів зміна питомої провідності обумовлена температурною залежністю рухливості.

На рисунку 7.4 показані зони власної і з домішками електропровідності напівпровідника.

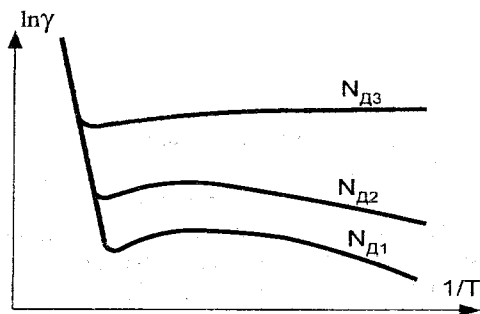


Рисунок 7.4 – Криві залежності питомої провідності напівпровідників від температури при різних концентраціях домішок ($N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$)

У зоні електропровідності з домішками зображені три криві для різних значень концентрації домішок, аж до виродження напівпровідника, коли залежність його питомої провідності в деякому інтервалі температур стає подібною до залежності питомої провідності металів.

За допомогою цих кривих можна знаходити як ширину забороненої зони напівпровідника $\Delta\omega$, так і енергію активації домішок ω_d або ω_a . У реальних напівпровідниках ці криві можуть значно відхилитися від зазначених внаслідок того, що фізичні явища описуються в теорії приблизно, так і тому, що в матеріалах, які застосовуються на практиці, не один, а кілька видів домішок, у яких енергії активації можуть бути різними. На підставі рисунка 7.4 для похилих лінійних (або квазілінійних) ділянок кривих в зоні електропровідності з домішками можемо написати:

$$\ln n = \ln A - b \frac{1}{T} \quad \text{або} \quad \ln \gamma = \ln A - b \frac{1}{T}, \quad (7.6)$$

звідки, наприклад,

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}. \quad (7.7)$$

Теорія електропровідності напівпровідників показує, що для монокристалів типу германія і кремнію постійна b визначається так:

$$b = \omega / (2k), \quad (7.8)$$

де ω – енергія активації;

k – постійна Больцмана.

Перетворюючи вираз (7.7) і виразивши його для питомого опору,

одержимо:

$$\rho = A \cdot e^{\frac{\omega}{2 \cdot k \cdot T}}. \quad (7.9)$$

Використовуючи дані конкретних матеріалів, узяті з кривих, обчислюють енергію активації ω електропровідності з домішками напівпровідника при різній їх концентрації. В області власної електропровідності за подібним виразом може бути визначена $\Delta\omega$ – ширина забороненої зони даного напівпровідникового матеріалу.

При ширині забороненої зони германія 0,72 еВ число власних носіїв заряду в ньому за кімнатної температури складає 10^{19} м^{-3} , у той час як домішки, що входять у кількість тисячної частки відсотка, при малій енергії активації (ω) вносять у нього в десятки тисяч разів більше число вільних зарядів. Тому для керування електропровідністю напівпровідник спочатку повинен бути ретельно очищений від випадкових домішок. На 10^8 - 10^9 атомів основної речовини має бути не більш одного іншорідного атома.

Температурний коефіцієнт питомого опору напівпровідників:

$$T \cdot K \cdot \rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = -\frac{1}{A \cdot e^{b/T}} \cdot A \cdot e^{b/T} \cdot b \cdot T^{-2} = -\frac{b}{T^2}. \quad (7.10)$$

З підвищенням температури температурний коефіцієнт питомого опору напівпровідників зменшується і перебуває в прямій залежності від енергії активації електропровідності напівпровідника ($b \sim \omega$).

Вплив деформації. Електропровідність твердих кристалічних тіл залежить від деформації внаслідок збільшення чи зменшення (розтягування і стиснення) міжатомних відстаней, що веде до зміни концентрації і рухливості носіїв. Концентрація носіїв може стати меншою або більшою внаслідок зміни ширини енергетичних зон кристала і зміщення домішкових рівнів, що у свою чергу веде до зміни енергії активації носіїв. Рухливість носіїв заряду змінюється через збільшення (зменшення) амплітуди коливань атомів при їх віддаленні (наближенні).

Величина, що чисельно характеризує зміни питомої провідності або питомого опору напівпровідників при деформації, – це тензочутливість d :

$$d = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}. \quad (7.11)$$

Тензочутливість – це відношення відносної зміни питомого опору напівпровідника до відносної зміни деформації в даному напрямку.

7.3 Вплив світла на електропровідність напівпровідників

Світлова енергія, що поглинається напівпровідником, викликає появу в ньому надлишкової (порівняно з рівноважним станом за даної температури) кількості носіїв зарядів, що приводить до зростання електропровідності.

Фотопровідністю називають збільшення електричної провідності речовини під дією електромагнітного випромінювання.

У фотопровідності проявляється квантова природа світла. Енергія фотона (у електрон-вольтах):

$$h \cdot \nu = \frac{1,23}{\lambda}, \quad (7.12)$$

де λ – довжина хвилі, мкм.

Енергія у власному напівпровіднику витрачається на утворення електронно-діркових пар за рахунок перекидання електронів з валентної зони в зону провідності. Тому існує гранична довжина хвилі, зумовлена енергією кванта, достатньою для переходу електрона з найвищого рівня валентної зони на найнижчий рівень зони провідності, тобто рівна ширині забороненої зони напівпровідника. За довгохвильовим краєм фотопровідності (ДКФ) можна визначити ширину забороненої зони напівпровідника, рис. 7.5. Для цього, екстраполюючи круто падаючу ділянку кривої до перетину з віссю абсцис, знаходять граничну довжину хвилі λ_r і енергію квантів, що обумовлює початок фотопровідності.

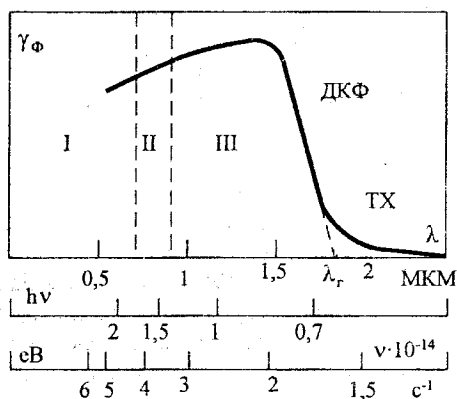


Рисунок 7.5 – Фотопровідність германія в залежності від довжини хвилі випромінювання (I – видима зона спектра, II – червона, III – інфрачервона, ДКФ – довгохвильовий край фотопровідності, ТХ – «теплі хвіст» кривої)

Оскільки заборонена зона різних напівпровідникових речовин має ширину від десятих часток електрон-вольта до 3 еВ, то фотопровідність може виявлятися в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частинах електромагнітного спектра. З рис. 7.5 видно, що оптична ширина забороненої зони германія 0,72 еВ, гранична довжина хвилі дорівнює приблизно 1,8 мкм, тобто лежить в інфрачервоній зоні спектра. Фотопровідність, при хвилях коротших 1,8 мкм, визначається переходом електронів з більш низьких рівнів валентної зони на більш високі рівні зони провідності. На кривій показаний «тепловий хвіст», що тягнеться до 1,9–2,0 мкм. Наявність його (тобто невеликої фотопровідності), викликувана квантами світла з енергією, трохи меншою ширини забороненої зони напівпровідника, можна пояснити двома фізичними явищами:

1. Окремі електрони можуть виявитися під впливом енергії фотонів і енергії теплових коливань кристалічних ґраток. Тоді ці електрони перейдуть у зону провідності;

2. Ширина забороненої зони не є абсолютно постійною і піддана флуктуаціям, тому що теплові коливання ґраток приводять до коливань миттєвої локальної щільності в об'ємі кристала і до зміни миттєвих відстаней між атомами, від яких вона залежить. Фотон з енергією $h \cdot \nu < \Delta w$, який поглинається у тому місці об'єму кристала, де миттєва ширина забороненої зони менша середньої, збуджує пари електрон–дірка. Таким чином, «хвіст» кривої на рисунку 7.5 має теплову природу.

7.4 Вплив сильних електричних полів

Електропровідність також залежить і від величини напруженості електричного поля. На рис. 7.6 показані криві залежності питомої провідності одного і того ж напівпровідника від напруженості електричного поля при різних температурах навколишнього середовища. Як видно з залежностей, при низьких значеннях напруженості поля (до критичного значення ЕК) зберігається дія закону Ома і питома провідність не залежить від напруженості поля. З ростом температури крива питомої провідності зміщується вгору, а нахил зростаючої частини стає меншим.

При більш високих значеннях напруженості поля починається інтенсивне зростання питомої провідності за експоненціальним законом, що призводить до руйнування структури напівпровідника (7.1). Це зумовлено ростом кількості носіїв зарядів, оскільки під впливом електричного поля вони більш легко вивільняються за допомогою теплового збудження.

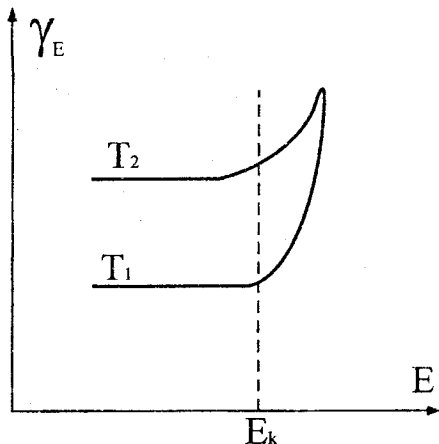


Рисунок 7.6 – Залежності питомої провідності напівпровідника від напруженості електричного поля при різних температурах навколишнього середовища ($T_1 > T_2$)

При подальшому збільшенні поля може з'явитися механізм ударної іонізації, що призводить до руйнування структури напівпровідників.

7.5 Елементи з властивостями напівпровідників

Серед елементів із властивостями напівпровідників найширше використовуються: германій, кремній, селен.

Германій. Вміст германія в земній корі невеликий, близько $7 \cdot 10^{-4} \%$. У результаті хімічної переробки вихідної сировини утворюється тетрахлорид германія, що шляхом подальших операцій переводять у двоокис германія (Ge_2) – порошок білого кольору. Двоокис германія відновлюється у водневій печі при температурі $650\text{-}700^\circ \text{C}$ до елементарного германія, що являє собою сірий порошок. У ряді випадків порошок германія одержують безпосередньо з GeCl_4 шляхом розкладання цієї сполуки при високій температурі в атмосфері парів цинку. Порошок германія піддають травленню в суміші кислот і сплавляють у злитки. Злитки германія використовують як вихідний матеріал для одержання особливо чистого германія методом зонного плавлення або ж для безпосереднього одержання монокристалів методом витягування з розплаву.

Германій застосовується для виготовлення випрямлячів змінного струму різної потужності, транзисторів різних типів. З нього виготовляють перетворювачі Холла та інші, що застосовуються для вимірювання напруженості магнітного поля, струмів і потужності, множення двох величин у приладах обчислювальної техніки тощо. Оптичні властивості

германія дозволяють використовувати його для фототранзисторів і фоторезисторів, оптичних лінз із великою світлосилою (для інфрачервоних променів), оптичних фільтрів, модуляторів світла і коротких радіохвиль. Внутрішній фотоэффект у германія спостерігається і при поглинанні середніх і швидких електронів, а також при гальмуванні елементарних часток великих мас. Так, при поглинанні α -частки відзначається імпульс струму тривалістю близько 0,5 мкс, що відповідає проходженню 10^6 електронів. Тому германій може бути використаний і для виготовлення лічильників ядерних часток. Робочий діапазон температур германієвих приладів від -60 до $+70$ °С; при підвищенні температури до верхньої межі прямий струм, наприклад у діодів, збільшується майже в два рази, а зворотний – у три рази. При охолодженні до $(50-60)$ °С прямий струм падає на 70–75%. Германієві прилади повинні бути захищені від дії вологості повітря.

Кремній отримують відновленням парами цинку чотирьохлористого кремнію при температурі 10000 °С в захисній атмосфері. Подальша обробка кремнію схожа на обробку германія, але пов'язана з додатковими труднощами, оскільки температура плавлення кремнію значно вища, ніж у германія і він реагує з вуглецем. Зонне плавлення його ведуть без графітових ложок. Сьогодні кремній є основним матеріалом для виготовлення напівпровідникових діодів, транзисторів, фотоелементів, схем мікроелектроніки. Кремнієві пристрої можуть експлуатуватися при досить високих температурах (його критична температура $120-200$ °С, залежно від ступеня очищення, що значно вище, ніж у германія).

Селен – використовується для виготовлення діодів та фотоелементів. Температурний інтервал роботи селенових випрямлячів від -60 до $+75$ °С. За своїми властивостями селенові випрямлячі значно поступаються перед германієвими і, тим більше, перед кремнієвими.

7.6 Напівпровідникові хімічні сполуки і матеріали на їх основі

Ці матеріали можуть мати найрізноманітніші електрофізичні властивості. Розглянемо найбільш важливі для електротехніки матеріали.

Карбід кремнію. Це сполуки елементів IV групи таблиці Менделєєва кремнію і вуглецю ($A^{IV}B^{IV}$), що відповідає формулі SiC_x ($x \approx 1$). Карбід кремнію стехіометричного складу містить 70,045% Si і 29,955% C (за масою). У природі цей матеріал зустрічається вкрай рідко і в обмежених кількостях. Залежно від вихідної сировини і особливостей технологічного процесу виходять кристали різного забарвлення. Колір кристалів Si і вид електропровідності залежать від сторонніх домішок або надлишку атомів Si чи C. Домішки елементів п'ятої групи (N, P, As, Sb, Bi) і заліза в Si дають зелене забарвлення і електропровідність n-типу; елементи другої (Ca, Be, Mg) і третьої (B, Al, Ga, In) груп дають блакитне та фіолетове

забарвлення (у товстих шарах чорне) і електропровідність р-типу; надлишок Si дає n-Si, а надлишок C – p-Si. Чисті кристали Si прозорі. Електропровідність кристалів Si за нормальних температур примусова і коливається в широких межах. Температурні залежності електропровідності електронного і діркового Si показані на рис. 7.7. Основні фізичні властивості кристалів Si такі:

Густина	3,2 Мг/м ³ .
Питома теплопровідність при 20 °С	10–40 Вт/(м·К).
Питома теплоємність	620–750 Дж/(кг·К).
Температурний коефіцієнт лінійного розширення.....	(4–7)·10 ⁻⁶ К ⁻¹ .
Твердість за мінералогічною шкалою (за Моосом) 9,5.	
Ширина забороненої зони.....	2,8-3,1 еВ.
Рухливість електронів при 20 °С.....	0,01–0,05 м ² /(В·с).
Рухливість дірок при 20 °С.....	0,002–0,005 м ² /(В·с).
Діелектрична проникність	6,5–7,5.
Термо-е.р.с щодо міді.....	300 мкВ/К.

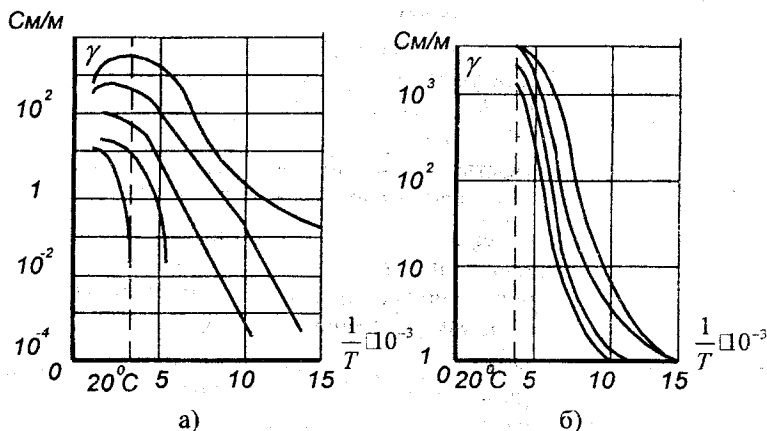


Рисунок 7.7 – Залежність питомої провідності декількох зразків n-Si (а) і p-Si (б) від температури

Електропровідність порошкоподібного карбіду кремнію залежить від електропровідності вихідного матеріалу, розміру помолу, ступеня стиску часток, напруженості електричного поля і температури. Наприклад, якщо питома провідність матеріалу приблизно 150 См/м, то при температурі 20 °С, розмірі зерен 63–75 мкм і тиску на порошок 60 МПа в зоні слабкого поля (до 5 В на сантиметр висоти порошку) питома провідність порошку буде приблизно $2 \cdot 10^{-6}$ См/м. При збільшенні зерна до 85–105 мкм і при

всіх колишніх умовах питома провідність порошку зростає до 10^{-3} См/м. Карбід кремнію в електротехніці знайшов застосування для виготовлення резисторів вентильних розрядників, що захищають лінії передачі високої напруги і апаратуру; для виробництва різних низьковольтних варисторів, використовуваних в автоматичній, обчислювальній техніці, у техніці високих температур.

Сполуки $A^{III}B^V$ являють собою перспективні матеріали, що обумовлюють широкі можливості вибору параметрів вихідного матеріалу (ширина забороненої зони, рухливість носіїв) для створення напівпровідникових приладів. Вони мають структуру сфалериту – цинкової обманки – подібну до структури алмаза з тією відмінністю, що природа і розміри вхідних часток різні.

Зі сполук $A^{III}B^V$ найбільш дослідженими і технологічно не дуже складними є фосфіди, арсеніди й антимоніди. Важливе практичне значення в даний час мають арсенід і фосфід галію та антимонід індію. Основним методом отримання сполук $A^{III}B^V$ є безпосередня взаємодія компонентів у вакуумі або в інертному газі. Температура плавлення сполук $A^{III}B^V$ знижуються з ростом суми атомних номерів і атомних мас вхідних у сполуку елементів. Точки плавлення сполук лежать вище відповідних температур плавлення елементів, за винятком антимоніду індію, температура плавлення якого 536°C лежить між температурами плавлення сурми 630°C і індію 157°C . Зі збільшенням атомної маси і суми атомних номерів зменшується ширина забороненої зони сполуки, тому що відбувається розмивання «електронних хмар» ковалентних зв'язків і вони все більш наближаються до металевого зв'язку.

Сполуки $A^{II}B^{VI}$ та інші напівпровідникові матеріали. Серед різних напівпровідникових сполук розглянемо деякі сульфіди й окисли, що знайшли найбільш широке технічне застосування.

Сульфіди. Сірчистий свинець (Pb), сірчистий вісмут (Bi_2S_3) і сірчистий кадмій (Cd) використовуються для виготовлення фоторезисторів. Сірчистий свинець зустрічається в природі у вигляді матеріалу галеніту (свинцевий блиск) і може бути отриманий штучно декількома способами. Pb буває в аморфній і кристалічній модифікаціях. Сірчистий вісмут отримують сплавленням вісмуту з сіркою при відсутності кисню. Кристали його відносять до ромбічної системи, вони мають сіро-чорний колір. Сірчистий кадмій отримують різними способами, він може бути аморфним або кристалічним. Колір його залежить від модифікації та вмісту домішок.

Деякі властивості сульфідів наведені в таблиці 7.1.

Фоторезистори з полікристалічного сірчистого свинцю мають криву спектральної чутливості, що охоплює видимий та інфрачервоний діапазони електромагнітного спектра, рис. 7.8. Чутливість фоторезисторів із

сірчастого вісмуту лежить у вузькій червоній області спектра, а фоторезисторів на основі сірчастого кадмію залежно від вмісту домішок і технології виготовлення зразків може мати максимуми при різних довжинах хвиль видимої частини спектра.

Таблиця 7.1 – Властивості сульфідів і окислів

Сполуки	Ширина забороненої зони, еВ	Рухливість електронів, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$
PbS	0,37	0,04	1114
B ₂ S ₃	1,25	-	685
CdS	2,1	0,02	1750
CuO	0,22-0,39	-	-
ZnO	3,2	0,01-0,1	-
TiO	3	0,0001	-

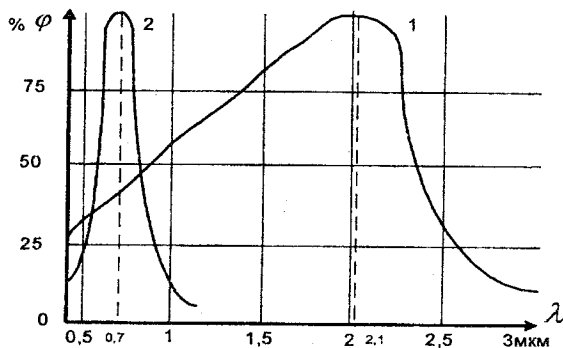


Рисунок 7.8 – Спектральна чутливість при 200 $^{\circ}\text{C}$ фоторезисторів з полікристалічного сірчастого свинцю (1) і сірчастого вісмуту (2)

Фоторезистори також застосовуються для підрахунку деталей у конвеєрному виробництві для контролю рівня рідких і сипучих тіл.

Оксиди. Окис міді (Cu_2O) – речовина малинового кольору – є напівпровідником тільки р-типу (рухливість дірок приблизно $0,01 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Провідність закису міді залежить від сторонніх домішок, термічної обробки і температури. Температурний коефіцієнт лінійного розширення $0,93 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, питома теплопровідність $6,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

З окислених мідних пластин, на поверхні яких утворився шар закису міді, були отримані перші типи напівпровідникових випрямлячів і фотоелементів.

Терморезистори виготовляються у вигляді стержнів, пластинок або таблеток методами керамічної технології. Опір і інші властивості терморезисторів залежать не тільки від складу, але й від розміру зерна, від технологічного процесу виготовлення; тиску при пресуванні (якщо напівпровідник беруть у вигляді порошку) і температури випалювання. Терморезистори використовуються для вимірювання, регулювання температури і термокомпенсації, для стабілізації напруги, обмеження імпульсних пускових струмів, вимірювання теплопровідності рідин, як безконтактні реостати і струмові реле часу.

З напівпровідникової кераміки виготовляються терморезистори, які відрізняються від усіх інших терморезисторів тим, що мають не негативний, а дуже великий позитивний температурний коефіцієнт опору (понад $+20\%/K$) у вузькому інтервалі температур (порядку $10\text{ }^\circ\text{C}$). Такі терморезистори називають позисторами. Їх виготовляють у вигляді дисків невеликої товщини і призначаються для контролю та регулювання температури, використання в системах пожежної сигналізації, запобігання перевантаження двигунів, обмеження струмів, вимірювання потоків рідин і газів.

Напівпровідникові матеріали складного складу. Вони знаходять технічне застосування при виготовленні термоелементів, термогенераторів і холодильних пристроїв. До таких матеріалів відносять, наприклад, потрійний сплав Bi-Sb-Zn , тверді розчини $0.25 \text{ PbS} \cdot 0.5 \text{ PbSe} \cdot 0.25 \text{ PbTe}$ та $0.3 \text{ PbS} \cdot 0.7 \text{ PbSe}$ та інші, що йдуть на виготовлення негативних електродів термоелементів.

7.7 Контрольні питання

1. Назвіть напівпровідникові матеріали, які використовують при виготовленні елементної бази електронної апаратури.
2. Власні напівпровідники.
3. Наведіть основні фізичні властивості кремнію, германія, арсеніду галію.
4. Домішкові напівпровідники.
5. Акцепторні домішки.
6. Донорні домішки.
7. Фізичне явище електронної провідності.
8. Фізичне явище «діркової» провідності.
9. Чим відрізняється температурна залежність питомого опору власного напівпровідника від домішкового?
10. Напівпровідникові хімічні сполуки і матеріали на їх основі.

8 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

8.1 Класифікація та основні властивості провідникових матеріалів

Провідниками можуть бути тверді речовини (це, в основному, метали і їх сплави), рідини та, за певних умов, газу. До твердих провідникових матеріалів відносять метали і сплави. Із провідникових матеріалів можуть бути виділені метали високої провідності з питомим опором $\rho=0,05$ мк Ом·м при нормальній температурі та сплави високого опору $\rho=0,3$ мк Ом·м. Метали високої провідності використовуються для проводів, струмопровідних жил кабелів, обмоток електричних машин і трансформаторів тощо. Сплави високого опору використовуються для виготовлення резисторів, електронагрівальних пристроїв, ниток ламп розжарювання і т. п. До матеріалів з надзвичайно малим питомим опором при низьких (криогенних) температурах належать надпровідники та кріопровідники.

Рідкі провідники – це розплавлені метали та різні електроліти. Для більшості металів температура плавлення дуже висока. Тільки ртуть, температура плавлення якої біля мінус 39 °С, використовується як рідкий провідник при нормальній температурі. Інші метали використовують як рідкі провідники при високих температурах.

Механізм проходження струму в металах у твердому та рідкому стані зумовлений рухом (дрейфом) вільних електронів під дією електричного поля. Тому метали називають провідниками з електронною електропровідністю або провідниками першого роду, а розчини кислот, лужні розчини та солі, іонні кристали в розплавленому стані – провідниками другого роду.

Газу і пари, у тому числі і пари металів, при низьких напруженостях електричного поля не є провідниками. Якщо напруженість поля перейде деяке критичне значення, що забезпечує початок ударної та фотоіонізації, то газ може стати провідником з електронною й іонною провідністю. Сильно іонізований газ при рівній кількості електронів і позитивних іонів в одиниці об'єму являє собою особливе провідне середовище, яке називають плазмою. Плазма може виникнути в результаті нагрівання до дуже високої t° (ізотермічна плазма) або при електричному розряді в газі (газопровідна плазма).

Плазма є хорошим провідником електричного струму і має діамантні властивості. Зокрема, ізотермічна плазма є провідником в магнітогазодинамічних генераторах (МГД генератори), які призначені для безпосереднього перетворення теплової енергії в електричну.

8.1.1 Електропровідність металів

Класична електронна теорія металів дає уявлення про твердий провідник як систему, що складається з вузлів кристалічних іонних ґраток, всередині яких знаходиться електронний газ з вільних електронів. У вільний стан від кожного атома металу переходить від одного до двох електронів. До електронного газу діють уявлення і закони характерні для звичайних газів. При зіткненнях електронів з вузлами кристалічних ґраток енергія, накопичена при прискоренні електронів в електричному полі, передається металевій основі провідника, внаслідок чого він нагрівається. Таким чином, електронна теорія металів дала можливість аналітично описати і пояснити знайдені раніше експериментальним шляхом основні закони електропровідності і втрат електричної енергії в металах. Виявилось можливим також пояснити і зв'язок між електропровідністю і теплопровідністю металів. Крім того, ряд дослідів підтверджував гіпотезу про електронний газ у металах, а саме:

1. При тривалому протіканні електричного струму через ланцюг, що складається з одних металевих провідників, не спостерігається проникнення атомів одного металу в інший;

2. При нагріванні металів до високих температур швидкість теплового руху вільних електронів збільшується, і найбільш швидкі з них можуть виходити з металу, переборюючи сили поверхневого потенційного бар'єра;

3. У момент несподіваної зупинки провідника, що швидко рухається, відбувається зсув електронного газу за законом інерції в напрямку руху. Зсув електронів призводить до появи різниці потенціалів на кінцях загальмованого провідника, і підключений до них вимірювальний прилад дає кидок покажчика по шкалі;

4. Досліджуючи поведінку металевих провідників у магнітному полі, встановили, що внаслідок викривлення траєкторії електронів у металевій пластинці, поміщеної в поперечне магнітне поле, з'являється поперечна е.р.с. і змінюється електричний опір провідника.

Однак з'явилися і протиріччя деяких висновків теорії з дослідними даними. Вони полягали у розходженні кривих температурної залежності питомого опору, що спостерігається на досліді і теорії; у невідповідності теоретично отриманих значень теплоємності металів експериментальним даним. Теплоємність металів, що спостерігається, менше теоретичної і така, начебто електронний газ не поглинає тепла при нагріванні металевого провідника.

Ці труднощі вдалося перебороти, вставши на позиції квантової механіки. На відміну від класичної електронної теорії квантова механіка вважає, що електронний газ у металах при звичайних температурах знаходиться в стані виродження. У цьому стані енергія електронного газу майже не залежить від температури, тобто тепловий рух майже не змінює енергію електронів. Тому теплота не затрачається на підігрів електронного

газу, що і виявляється при вимірюванні теплоємності металів. У стан, аналогічний звичайним газам, електронний газ приходить при температурах порядку тисяч градусів Кельвіна. Уявляючи метал як систему, у якій позитивні іони скріплюються за допомогою електронів, що вільно рухаються, легко зрозуміти природу всіх основних властивостей металів: пластичності, ковкості, гарній теплопровідності і високій електропровідності.

8.1.2 Властивості провідникових матеріалів

До найважливіших параметрів, що характеризують властивості провідникових матеріалів, належать:

- питома провідність γ або обернена їй величина – питомий опір ρ ;
- температурний коефіцієнт питомого опору (ТК ρ) або α_ρ ;
- теплопровідність γ_T ;
- контактна різниця потенціалів і термоелектрорушійна сила (термо-е.р.с.);
- робота виходу електронів з металу;
- межа міцності при розтяганні σ_p і відносне подовження при розриві $\Delta l/l$.

Питома провідність і питомий опір провідників. Зв'язок щільності струму J , А/м² і напруженості електричного поля E , В/м у провіднику визначається за формулою:

$$J = \gamma \cdot E, \quad (8.1)$$

де γ , См/м – питома провідність провідникового матеріалу.

Відповідно до закону Ома γ не залежить від напруженості електричного поля E при зміні останньої в досить широких межах. Величина $\rho = 1/\gamma$ називається питомим опором провідника, що має опір R , довжину l , з постійним перерізом S і обчислюється за формулою:

$$\rho = R \cdot S/l. \quad (8.2)$$

Температурний коефіцієнт питомого опору металів. Число носіїв заряду (концентрація вільних електронів) у металевому провіднику при підвищенні температури залишається практично незмінним. Однак, внаслідок посилення коливань вузлів кристалічних ґраток з ростом температури, з'являється більше завад на шляху спрямованого руху вільних електронів під дією електричного поля, тобто зменшується середня довжина вільного пробігу електрона λ , зменшується рухливість електронів i , як наслідок, зменшується питома провідність металів і

зростає питомий опір. Тобто, температурний коефіцієнт питомого опору металів (K^{-1}) позитивний.

Теплопровідність металів. Передача тепла через метал відбувається вільними електронами, що визначають і електропровідність металів, кількість яких в одиниці об'єму металу досить велика. Тому, як правило, теплопровідність γ_T металів набагато більша, ніж теплопровідність діелектриків. Очевидно, що за інших рівних умов, чим більша питома електрична провідність γ металу, тим більша повинна бути і його теплопровідність. При підвищенні температури, коли рухливість електронів у металі та, відповідно, його питома провідність γ зменшуються, відношення теплопровідності металу до його питомої провідності γ_T/γ повинно зростати. Математично це виражається законом Відемана–Франца–Лоренца:

$$\gamma_T/\gamma = L_0 \cdot T, \quad (8.3)$$

де T – абсолютна температура, K ;
 L_0 – число Лоренца, що дорівнює:

$$L_0 = \frac{\pi^2 \cdot k^2}{3 \cdot e^2}. \quad (8.4)$$

Термоелектрорушійна сила. При спаюванні двох різних металевих провідників між ними виникає контактна різниця потенціалів. Причина її появи полягає в розходженні значень роботи виходу електронів з різних металів, а також різної концентрації електронів в місті контакту. З електронної теорії металів контактна різниця потенціалів між металами А і В визначається за формулою:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B}, \quad (8.5)$$

де U_A, U_B – потенціали з'єднаних металів;
 n_A, n_B – концентрації електронів у металах А і В;
 k, e , – стала Больцмана і заряд електрона.

Якщо температури «спаїв» однакові, то сума різниць потенціалів у замкнутому ланцюзі дорівнює нулеві. Коли один зі спаїв має температуру T_1 а інший – температуру T_2 , між спаями виникає термоелектрорушійна сила:

$$\begin{aligned}
 U &= U_{AB} - U_{BA} = U_B - U_A + \frac{k \cdot T_1}{e} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B} + U_A - U_B + \frac{k \cdot T_2}{e} \cdot \ln \frac{n_B}{n_A} = \\
 &= \frac{k}{e} \cdot (T_2 - T_1) \cdot \ln \frac{n_A}{n_B}.
 \end{aligned}
 \tag{8.6}$$

З формули (8.6) видно, що термо-е.р.с. пропорційна різниці температур спайів.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення провідників. При виготовленні елементів конструкцій часто використовують матеріали з різними значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення, наприклад, метал–скло або метал–кераміка та інші. При зміні температури може виникнути порушення щільності з'єднань і навіть розтріскування скла або кераміки. Тому при підборі матеріалів необхідно добиватись максимально близьких значень їх коефіцієнтів лінійного розширення. Він також використовується і для розрахунку температурного коефіцієнта електричного опору провідникових матеріалів:

$$TK_p = \alpha_p = \alpha \cdot \rho - \alpha_1. \tag{8.7}$$

Механічні властивості провідників. Вони характеризуються межею міцності при розтягуванні σ_p і відносним видовженням при розриві $\Delta l/l$, а також крихкістю, твердістю та ін. Механічні властивості металевих провідників великою мірою залежать від механічної та термічної обробок, від наявності легувальних домішок, температури плавлення й кипіння, питомої теплоємності та іншого.

8.2 Матеріали високої провідності

Вони використовуються для виготовлення обмоток електричних машин, апаратів, приладів і для передачі електричної енергії.

До матеріалів з малим питомим опором висуваються такі вимоги: низьке значення питомого опору та температурного коефіцієнта питомого опору; досить висока механічна міцність; здатність легко оброблятися; здатність добре зварюватися і створювати при цьому надійні сполуки з малим електричним опором; достатня корозійна стійкість. Найбільш широко застосовуються як провідникові матеріалами з високою провідністю мідь і алюміній.

Мідь. Переваги міді, що забезпечують їй широке застосування як провідникового матеріалу, такі: малий питомий опір (із усіх металів тільки срібло має трохи менший питомий опір, ніж мідь); досить висока механічна міцність; задовільна, в більшості випадків, стійкість до корозії (мідь окисляється на повітрі навіть в умовах високої вологості значно повільніше, ніж, наприклад, залізо; інтенсивне окислення міді відбувається

тільки при підвищених температурах); гарна оброблюваність; відносна легкість спаювання та зварювання.

Марки міді. Як провідниковий матеріал використовується мідь марок М1 і М0. Мідь марки М1 містить 99,9% Cu, а в загальній кількості домішок 0,1% кисню повинно бути не більше 0,08%. Присутність у міді кисню погіршує її механічні властивості. Кращі механічні властивості має мідь марки М0, у якій до 0,05% домішок, у тому числі до 0,02% кисню. З міді марки М0 виготовляють тонкі провідники. При холодному протягуванні одержують тверду (твердотягнена) мідь МТ, яка має високу міцність при розтягуванні і мале відносне подовження при розриві, а також має твердість і пружність при вигині.

Стандартна мідь при 20 °С має питому провідність 58 МСм/м, тобто $\rho = 0,017241$ мкОм·м. Нормовані властивості твердого та м'якого мідних проводів в порівнянні з алюмінієвим наведені в табл. 8.1.

Тверду мідь використовують там, де необхідно забезпечити особливо високу механічну міцність, твердість і опір до стирання: для контактних проводів, шин розподільних пристроїв, колекторних пластин електричних машин тощо. М'яку мідь у вигляді проводів круглого і прямокутного перерізів застосовують, головним чином, як струмопровідні жили кабелів і обмотувальних проводів, де важливі гнучкість і пластичність.

Таблиця 8.1 – Властивості мідних та алюмінієвих проводів

Параметр	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності при розтягуванні σ_p , МПа, не менше	360-390	260-280	160-170	80
Відносне подовження при розриві $\Delta l/l$, %, не менше	0,5-2,5	18-35	1,5-2	10-18
Питомий опір ρ , мкОм·м, не більше	0,0179-0,0182	0,01754	0,0295	0,0290

Мідь є порівняно дорогим і дефіцитним матеріалом. Відходи міді на електротехнічних підприємствах необхідно ретельно збирати і важливо не змішувати їх з іншими металами, щоб можна було піддати ці відходи переплавленню і знову використовувати як електротехнічну мідь. Мідь усе ширше замінюється іншими металами, особливо алюмінієм.

Алюміній. Він є другим за значенням після міді провідниковим матеріалом. Алюміній належить до легких металів із щільністю менше 5 Мг/м³, густина литого алюмінію близько 2,6; а прокатаного – 2,7 Мг/м³.

Алюміній приблизно в 3,5 раза легший міді. Температурний коефіцієнт

лінійного розширення і питома теплоємність алюмінію більші ніж міді. Алюміній порівняно з міддю має дещо гірші властивості – як механічні, так і електричні. При однаковому перерізі і довжині електричний опір алюмінієвого проводу більший ніж мідного у 1,63 раза. Отже, щоб одержати алюмінієвий провід такого ж електричного опору, як і мідний, потрібно взяти його переріз у 1,63 раза більшим, тобто його діаметр повинен бути в 1,3 раза більший від діаметра мідного проводу. Якщо ж порівняти за масою два відрізки алюмінієвого і мідного проводів однієї довжини і того самого опору, то виявиться, що алюмінієвий провід хоча і товщий мідного, але легший від нього приблизно в два рази. Тому для виготовлення проводів однієї і тієї ж провідності при даній довжині алюміній вигідніший від міді якщо тонна алюмінію дорожча від тонни міді не більше, ніж у два рази. Досить важливо, що алюміній менш дефіцитний, ніж мідь. У даний час алюміній не тільки замінив мідь у повітряних лініях електропередачі, але впроваджується й у виробництво ізованих кабельних виробів та обмоток електричних машин.

Для електротехнічних цілей використовують алюміній, що містить не більше 0,5% домішок, марка А1. Ще більш чистий алюміній марки АВ00, який має не більше 0,03% домішок, застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів і корпусів електролітичних конденсаторів. Алюміній найвищої чистоти АВ0000 має вміст домішок, що не перевищує 0,004%. Різні домішки в різному ступені знижують питому провідність у алюмінію. Домішки Ni, Si, Zn або Fe при вмісті їх 0,5% знижують у відпаленого алюмінію питому провідність не більше ніж на 2-3%. Більш помітну дію роблять домішки Cu, Ag і Mg, при тому ж самому вмісті понижують у алюмінію на 5-10%. Дуже сильно знижують у алюмінію домішки Ti і Mn.

Прокатування, протягування і випалювання алюмінію аналогічні відповідним операціям над міддю. З алюмінію можна отримати тонку (до 6-7 мкм) фольгу, що використовується як обкладинки в паперових і плівкових конденсаторах. Властивості твердого і м'якого алюмінієвого проводів наведені в табл. 8.1. Алюміній досить активно окисляється і покривається тонкою оксидною плівкою з великим електричним опором. Ця плівка захищає алюміній від подальшої корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів і робить неможливим паяння алюмінію звичайними методами. У місцях контакту алюмінію і міді можлива гальванічна корозія. Якщо область контакту піддається дії вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням е.р.с., причому полярність цієї пари така, що на зовнішній поверхні контакту струм йде від алюмінію до міді, і алюмінієвий провідник може бути сильно зруйнований корозією. Тому місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні ретельно захищатися від зволоження. Іноді, наприклад, для заміни свинцю в захисних кабельних оболонках, використовується алюміній з вмістом

домішок не більше 0,01% (замість 0,5% для звичайного провідникового алюмінію). Такий особливо чистий алюміній, порівняно зі звичайним, більш м'який і пластичний, має підвищену стійкість стосовно корозії.

Сталеалюмінієвий провід. Він широко застосовується у лініях електропередачі і являє собою осердя, збите зі сталевих жил і оповите зовні алюмінієвим проводом. У проводах такого типу механічна міцність визначається, головним чином, сталевим осердям, а електрична провідність – алюмінієм. Збільшений зовнішній діаметр сталеалюмінієвого проводу порівняно з мідним на лініях передачі високої напруги є перевагою, тому що зменшується небезпека виникнення корони внаслідок зниження напруженості електричного поля на поверхні проводу.

Сплави міді. В окремих випадках крім чистої міді застосовуються її сплави з оловом, кремнієм, фосфором, берилієм, хромом, магнієм, кадмієм. Такі сплави, що носять назву бронзи, при правильно підбраному складі мають значно більш високі механічні властивості, ніж чиста мідь: ор бронзи може бути 800–1200 МПа і більше. Бронзи широко застосовують для виготовлення струмопровідних пружин та іншого. Введення в мідь кадмію при порівняно малому зниженні питомої провідності (рис. 8.1) дає значне підвищення механічної міцності і твердості. Кадмієву бронзу застосовують для контактних проводів і колекторних пластин особливо відповідального призначення. Ще більша механічна міцність у берилієвої бронзи (σ_r до 1350 МПа). Сплав міді з цинком утворює латунь, яка має досить високе відносне подовження перед розривом при підвищеною порівняно з чистою міддю, межею міцності при розтягуванні. Це дає латуні технологічні переваги перед міддю при обробці штампуванням, глибоким витягуванням. Латунь застосовують в електротехніці для виготовлення різних струмопровідних деталей. Основні властивості мідних електротехнічних сплавів наведені в табл. 8.2.

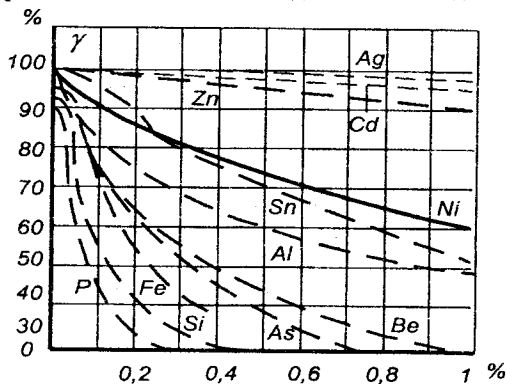


Рисунок 8.1 – Залежності питомої провідності міді від вмісту домішок у % від маси (провідність чистої міді прийнята за 100%, домішки зазначені на кривих)

Таблиця 8.2 – Властивості мідних електротехнічних сплавів

Сплав	Стан	Питома провідність γ , % в порівнянні з провідністю міді	Межа міцності при розриві МПа	Відносне подовження при розриві $\Delta l/l$, %
Кадмієва бронза (0,9% Cd)	Тверда Відпалена	83–90...95	До 1050 310	4 До 50
Бронза (0,8% Cd, 0,6 Sn)	Тверда Відпалена	50–55 55–60	До 730 290	4 До 55
Бронза (2,5%Al 2% Sn)	Тверда Відпалена	15–18 15–18	До 970 370	4 До 45
Фосфориста бронза (7% Sn, 0,1% P)	Тверда Відпалена	10–15 10-15	До 1050 400	3 До 60
Латунь (30% Zn)	Тверда Відпалена	25 25	До 880 320–350	5 До 60–70

Алюмінієві сплави мають підвищену механічну міцність. Прикладом такого сплаву є альдрей, що містить 0,3–0,5% Mg, 0,4–0,7% Si і 0,2–0,3% Fe, інше Al. Високих механічних властивостей альдрей набуває після особливої обробки (загартування катанки, охолодження у воді з температури 510–550 °С, волочіння і наступна витримка при температурі близько 150 °С). Альдрей у вигляді проводів має густину 2,7 Мг/м³, його $\sigma_p = 350$ МПа, $\Delta l/l = 6,5\%$, $\alpha_1 = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 0,0317$ мкОм·м, $\alpha_p = 0,0036 \text{ K}^{-1}$. Таким чином, альдрей, практично зберігаючи легкість алюмінію є досить близьким до нього за питомою провідністю, а за механічною міцністю наближається до твердої міді. У даний час розроблені алюмінієві сплави типу альдрей, які не потребують термічної обробки.

8.3 Надпровідники і кріопровідники

Надпровідники. При зниженні температури питомий опір ρ металів зменшується. А при досягненні кріогенних температур, що наближаються до абсолютного нуля, раптово, різким стрибком падає до надзвичайно малого значення. Це зникнення електричного опору, тобто поява практично нескінченної питомої провідності матеріалу, було названо надпровідністю, а температура, при охолодженні до якої відбувається перехід речовини у надпровідний стан, – температурою надпровідникового переходу T_c . Крім ртуті є багато інших матеріалів, і не тільки чистих металів, але й різних сплавів і хімічних сполук, здатних при охолодженні до досить низької температури переходити у надпровідний стан.

Деякі речовини, у тому числі такі найкращі провідникові матеріали, як срібло і мідь, при найбільш низьких, досягнутих у даний час температурах перевести у надпровідний стан не вдається. Надпровідниками можуть бути не тільки сполуки і сплави металів, яким характерна надпровідність, але й сполуки, до складу молекул яких входять винятково атоми елементів, що не є надпровідниками. На рис. 8.2 показано зміну опору при глибокому охолодженні зразків ртуті і платини, що не належить до надпровідників (по осі абсцис відкладена абсолютна температура в Кельвінах, а по осі ординат – відношення опору зразка при даній температурі R_T до опору R_{273} при температурі $T = 273 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$).

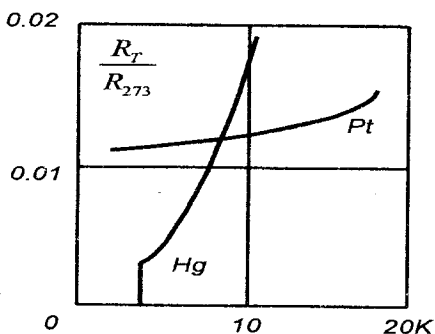


Рисунок 8.2 – Зміна опору зразків ртуті і платини при глибокому охолодженні

Явище надпровідності пов'язане з тим, що електричний струм, один раз наведений у надпровідниковому контурі, буде довгостроково циркулювати у цьому контурі без помітного зменшення. Такий надпровідниковий контур створює в навколишньому просторі магнітне поле, подібно постійному магнітові, що не вимагає живлення від джерела струму.

Кріопровідність. Крім явища надпровідності у сучасній електротехніці усе ширше використовується явище кріопровідності, тобто досягнення деякими металами досить малої питомої провідності при криогенних температурах, більш високих, ніж температура надпровідного переходу. Матеріали, що мають особливо сприятливі властивості для застосування їх як провідників в умовах криогенних температур, називаються кріопровідниками або гіперпровідниками.

Досить мале, але все-таки кінцеве значення питомого опору ρ кріопровідника при його робочій температурі обмежує припустиму густину струму в ньому, хоча ця густина може бути набагато вищою, ніж у звичайних провідниках при нормальній або підвищеній температурі. Природно, що гіперпровідники, у яких при зміні температури в широких межах питомий опір ρ змінюється плавно, без стрибків, не можуть

використовуватися в ряді пристроїв, дія яких заснована на тригерному ефекті появи і руйнування надпровідності. Однак застосування кріопровідників в електричних машинах, апаратах, кабелях має і свої переваги, причому досить істотні. У той час як у надпровідникових пристроях як охолодний агент застосовується рідкий гелій, робоча температура кріопровідників досягається застосуванням більш висококиплячих і дешевих холодоагентів: рідкого водню або навіть рідкого азоту, це значно спрощує й здешевлює виконання та експлуатацію пристрою. Крім того, у надпровідниковому пристрої, наприклад електромагніті, по обмотці якого проходить сильний струм, накопичується велика енергія. Якщо через випадкове підвищення температури або магнітної індукції хоча б на малій ділянці надпровідникової контури, надпровідність буде зруйнована, і раптово звільниться велика кількість енергії, що може викликати серйозну аварію. У випадку ж кріопровідникового кола підвищення температури викличе лише поступове зростання опору без ефекту вибуху.

Найбільший інтерес для використання як кріопровідника, крім звичайних провідникових матеріалів – алюмінію і міді, викликає застосування берилію. Берилій значно дорожчий і складніший у технологічному відношенні. Ряд сполук берилію сильно токсичний, але берилій при охолодженні рідким азотом має найменше, в порівнянні з алюмінієм і міддю, значення ρ . Очевидно, що робота з досить дешевим рідким азотом значно простіша, ніж робота з рідким воднем.

В усіх випадках для одержання кріопровідникових матеріалів потрібна висока чистота металу і неможливість наклепу. Шкідливий вплив домішок при кріогенних температурах позначається набагато сильніше, ніж при нормальній температурі. Кріопровідники можуть з успіхом використовуватися для обмоток електричних машин і трансформаторів, для струмопровідних жил кабелів тощо. У ряді випадків застосування кріопровідників досить перспективно.

8.4 Сплави високого опору

При використанні цих сплавів для електровимірювальних приладів і зразкових резисторів, крім високого питомого опору ρ , потрібні також висока стабільність ρ у часі, малий температурний коефіцієнт питомого опору α_ρ і малий коефіцієнт термо-е.р.с. у парі даного сплаву з міддю. Сплави для електронагрівальних елементів повинні довгостроково працювати на повітрі при високих температурах (до 1000 °С і навіть вище). Крім того, у багатьох випадках потрібна технологічність сплавів – можливість виготовлення з них гнучкого проводу, іноді досить тонкого, діаметром до сотих часток міліметра. Бажано, щоб сплави, які використовуються для приладів, вироблених у великих кількостях

(реостатів, електроплиток, електричних чайників, паяльників тощо), були дешевими і, за можливістю не містили дефіцитних компонентів.

Манганін. Це найбільш широко застосовуваний для виготовлення зразкових резисторів сплав. Зразковий склад його: Cu – 85%, Mn – 12%, Ni – 3%. Назва походить від наявності в ньому марганцю (латинське manganum), а жовтуватий колір пояснюється великим вмістом міді. Значення ρ манганіну – 0,42-0,48 мкОм·м, α_p досить малий, $(6-50) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, коефіцієнт термо-е.р.с. у парі з міддю лише 1-2 мкВ/К. Манганін може витягатися в тонкий, діаметром до 0,02 мм, провід. Часто манганіновий провід випускається в емалевій ізоляції. Для забезпечення малого значення α_p і його стабільності у часі манганіновий провід піддається спеціальній термообробці (обпалення у вакуумі при температурі 550-600 °С з наступним повільним охолодженням, а намотані котушки іноді додатково обпалюються при 200 °С). Гранична довгостроково припустима робоча температура сплавів типу манганіну не більше 200 °С, механічні властивості: $\sigma_p = 450 \div 600 \text{ МПа}$, $\Delta l/l = 15 \div 30\%$. Густина манганіну 8,4 Мг/м³.

Константан. Це сплав, що містить близько 60% міді і 40% нікелю. Цей склад забезпечує мінімальне значення α_p в системі Cu-Ni при досить високому значенні ρ . Назва «константан» зумовлена значною сталістю ρ при зміні температури. Для сплавів типу константану α_p при нормальній температурі складає мінус $(5-25) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $\rho = 0,48 \div 0,52 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. За механічними властивостями константан близький до манганіну ($\sigma_p = 400 \div 500 \text{ МПа}$, $\Delta l/l = 20 \div 40\%$). Його густина 8,9 мг/м³.

Нагрівостійкість константану вища, ніж манганіну. Константан застосовується для виготовлення реостатів і електронагрівальних елементів, що довгостроково працюють при температурі до 450 °С.

Істотною відмінністю константану від манганіну є висока термо-е.р.с. константану в парі з міддю, а також із залізом. Його коефіцієнт термо-е.р.с. у парі з міддю складає 45-55 мкВ/К. Це є недоліком при використанні константанових резисторів у вимірювальних схемах, тому що при наявності різниці температур у місцях контакту константанових провідників з мідними виникають термоелектрорушійні сили, які можуть привести до похибок, особливо при мостових і потенціометричних методах вимірювань. Проте константан з успіхом може бути використаний при виготовленні термопар, що служать для вимірювання температури, якщо остання не перевищує декількох сотень градусів.

Широкому застосуванню константану перешкоджає великий вміст у його складі дорогого і дефіцитного нікелю.

Сплави на основі заліза. Ці сплави в основному застосовуються для електронагрівальних елементів. Висока нагрівостійкість таких елементів пояснюється введенням у їхній склад різних металів, які мають високі

значення об'ємних коефіцієнтів оксидації K і тому при нагріванні на повітрі утворюється суцільна оксидна плівка. Такими металами є нікель, хром і алюміній. Залізо має об'ємний коефіцієнт оксидації менший одиниці і тому при нагріванні легко окисляється. Чим більший вміст заліза в сплаві, наприклад, з Ni і Cr , тим менш нагрівостійкий цей сплав.

Сплави системи Fe-Ni-Cr. Вони називаються ніхромами або, при підвищеному вмісті Fe , – фероніхромами, сплави системи $Fe-Cr-Al$ називаються фехралами і хромалами. Слід зауважити, що для різних сплавів за прийнятими стандартами часто застосовуються умовні позначки, що складаються з букв і чисел. Букви ці позначають найбільш характерні елементи, що входять до складу сплаву, причому буква входить у назву елемента, але не обов'язково є першою буквою цієї назви (наприклад, B означає ніобій, W – вольфрам, Mn – марганець, Cu – мідь, Ko – кобальт, Li – берилій, Ni – нікель, Ti – титан, Cr – хром, Al – алюміній), а число – приблизний вміст даного компонента в сплаві (у відсотках за масою), додаткові цифри на початку позначення визначають підвищену (цифра 0) або знижену якість сплаву.

Стійкість хромонікелевих сплавів за високої температури в повітряному середовищі пояснюється близькими значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення цих сплавів і їхніх оксидних плівок. Тому розтріскування оксидних плівок має місце тільки при різких змінах температури. Тривалість роботи електронагрівальних елементів з ніхрому й аналогічних сплавів може бути в багато разів збільшена за умови унеможливлення доступу кисню до поверхні провідників. У трубчастих нагрівальних елементах провід зі сплаву високого опору проходить по осі трубки зі стійкого до окислювання металу, а проміжок між проводом і трубкою заповнюється порошком діелектрика з високою теплопровідністю (наприклад, магнезією MgO). При додатковому протягуванні такої трубки її зовнішній діаметр зменшується, магнезія ущільнюється і утворює механічно міцну ізоляцію внутрішнього провідника. Такі нагрівальні елементи застосовуються, наприклад, в електричних кип'ятильниках і можуть працювати досить довгостроково без пошкоджень.

Механічні параметри ніхромів: $\sigma_p = 650\div 700$ МПа, $\Delta l/l = 25\div 30\%$. Ніхром досить технологічний: їх можна легко протягувати в порівняно тонкий провід або стрічку і вони мають високу робочу температуру. Але, як і в константані, у цих сплавах великий вміст дорогого і дефіцитного компонента нікелю.

Хромоалюмінієві сплави. До них відносять фехраль і хромаль. Вони набагато дешевші ніхромів, тому що хром і алюміній порівняно дешеві і легкодоступні. Однак ці сплави менш технологічні, більш тверді і тендітні. З них можуть бути отримані проводи і стрічки лише більшого поперечного перерізу ніж з ніхромів. Тому ці сплави використовуються, в основному, в електротермічній техніці для електронагрівальних пристроїв великої

потужності та промислових електричних печей. Вони мають високу механічну міцність ($\sigma_p = 700 \div 800$ МПа при $\Delta l/l = 10 \div 20\%$). Густина цих сплавів перебуває в межах від 6,9 до 7,5 Мг/м³.

Біметал. При використанні сплавів високого опору для електровимірювальних приладів і зразкових резисторів, крім високого питомого опору ρ , потрібні також висока стабільність ρ в часі, малий температурний коефіцієнт питомого опору α_p і малий коефіцієнт термо-е.р.с. у парі даного сплаву з міддю. Крім того, у багатьох випадках потрібна технологічність сплавів – можливість виготовлення з них гнучкого проводу, (іноді досить тонкого (діаметром до сотих часток міліметра)).

У ряді випадків для зменшення витрат кольорових металів у провідникових конструкціях вигідно застосовувати так званий провідниковий біметал. Це сталь, покрита зовні шаром міді, обидва метали з'єднані один з одним міцно по всій своїй поверхні.

Для виготовлення біметалу застосовують два способи. Гарячий, коли сталеву болванку ставлять у форму, а проміжок між болванкою і стінками форми заливають розплавленою міддю. Отриману після охолодження біметалеву болванку піддають прокатуванню і протягуванню. Холодний, або електролітичний, у якому мідь осаджують електролітично на сталевий дріт, що пропускається через ванну з розчином мідного купоросу. Холодний спосіб забезпечує велику рівномірність товщини мідного покриття, але вимагає значної витрати електроенергії. Крім того, при холодному способі не забезпечується настільки міцне зчеплення міді зі сталлю, як при гарячому способі.

Біметал має механічні й електричні властивості, проміжні між властивостями суцільного мідного і суцільного сталевого провідника того ж перерізу. Міцність біметалу більша, ніж міді, але електрична провідність менша. Наявність міді в зовнішньому шарі забезпечує при змінному струмі більш високу провідність усього проводу в цілому, з іншого боку – мідь захищає розташовану під нею сталь від корозії. Біметалевий провід випускається зовнішнім діаметром від 1 до 4 мм зі вмістом міді не менше 50% від повної маси проводу. Значення σ_p з розрахунку на повний переріз повинно бути не менше 550–700 МПа, а $\Delta l/l$ – не більше 2%.

Такий провід застосовують для ліній зв'язку і ліній електропередачі. З провідникового біметалу виготовляються шини для розподільних пристроїв, смуги для рубильників і різні струмопровідні частини електричних апаратів.

8.5 Контрольні питання

1. Які матеріали називають провідниками?
2. Наведіть класифікацію провідникових матеріалів.
3. Яка природа електропровідності провідників першого роду?

4. Назвіть основні електричні параметри провідників.
5. Що називають питомим електричним опором та питомою електричною провідністю?
6. Дайте означення температурного коефіцієнта питомого електричного опору.
7. Назвіть провідникові матеріали, які відносять до провідників високого опору.
8. Наведіть формулу, за якою можна визначити опір провідників довжиною l та площею поперечного перерізу S .
9. Як залежить питомий опір металевих провідників від температури та домішок?
10. Наведіть формулу залежності опору провідника від його температури.
11. Назвіть провідникові матеріали та елементи й пристрої електричних кіл, для виготовлення яких використовують дані матеріали.

9.1 Загальні відомості про магнітні властивості матеріалів

Як магнітні матеріали технічне значення мають феромагнітні речовини і феромагнітні хімічні сполуки (ферити).

Явище феромагнетизму пов'язане з утворенням всередині деяких матеріалів при температурі, що нижча визначеної (точки Кюрі), таких кристалічних структур, в яких в межах макроскопічних областей електронні спіни орієнтуються паралельно один до одного і є однаково направленими. Характерним для феромагнітного стану є самовільна (спонтанна) намагніченість (без прикладання зовнішнього магнітного поля), але напрямок орієнтації магнітних моментів окремих доменів є досить різним. Магнітний потік такого тіла у зовнішньому просторі дорівнює нулю.

Монокристали феромагнітних речовин характеризуються магнітною анізотропією, що виражається в різній легкості намагнічування вздовж різних осей.

У тих випадках, коли анізотропія в полікристалічних магнетиках виражена досить різко, прийнято говорити, що феромагнетик має магнітну текстуру. Одержання заданої магнітної текстури має велике значення і використовується в техніці для створення у певному напрямку підвищених магнітних характеристик матеріалу.

Процес намагнічування феромагнітного матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля зводиться: до росту тих доменів, магнітні моменти яких складають найменший кут з напрямком поля, і до зменшення розмірів інших доменів (процес зсуву границь доменів); до повороту магнітних моментів у напрямку зовнішнього поля (процес орієнтації). Магнітне насичення досягається тоді, коли ріст доменів припиниться і магнітні моменти всіх спонтанно намагнічених мікрокристалічних ділянок виявляться орієнтованими в напрямку поля. Схема орієнтації спінів у доменах наведена на рис. 9.1.

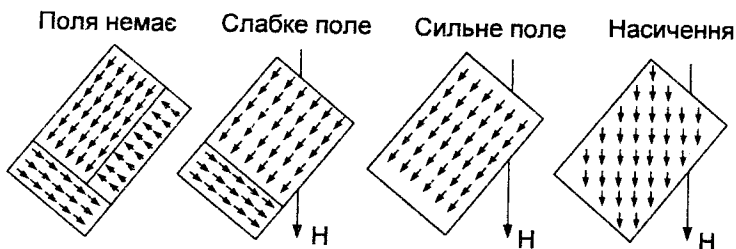


Рисунок 9.1 – Схема орієнтації спінів у доменах при намагнічуванні феромагнетика

При намагнічуванні феромагнітних монокристалів спостерігається зміна їхніх лінійних розмірів. Це явище називається магнітострикцією. Магнітострикція монокристала заліза різна для різних напрямків у кристалі. Монокристал заліза, намагнічений у напрямку ребра куба, подовжується в напрямку діагоналі, тобто стискується в напрямку намагнічування. Магнітострикція спостерігається й у полікристалічних матеріалів. З трьох основних феромагнітних елементів (Fe, Ni, Co) найбільша магнітострикція у нікелю. На рис. 9.2 наведені залежності відносної зміни лінійних розмірів монокристала нікелю по різних напрямках у кристалі від напруженості зовнішнього магнітного поля.

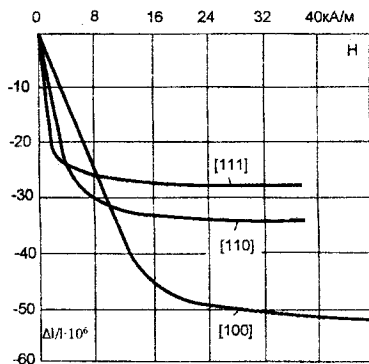


Рисунок 9.2 – Криві магнітострикційної деформації нікелю по трьох напрямках у кристалі

Знак магнітострикційної деформації в різних матеріалів може бути як позитивним (розтягування в напрямку поля), так і негативним, зміна знака може спостерігатися також у того самого матеріалу (наприклад, заліза) при зміні напруженості магнітного поля. Протікання процесів намагнічування феромагнітного матеріалу практично характеризують кривими намагнічування $B(H)$, які мають подібний характер для усіх феромагнетиків. На рисунку 9.3 наведені основні криві намагнічування деяких магнітних матеріалів.

Магнітна проникність визначається по основній кривій намагнічування як відношення індукції B до напруженості магнітного поля H в даній точці кривої намагнічування, з урахуванням у системі СІ магнітної постійної $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

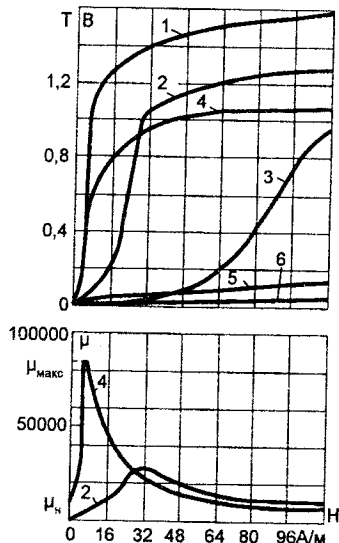


Рисунок 9.3 – Залежності магнітної індукції (криві намагнічування) і магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля (1 – залізо особливо чисте, 2 – залізо чисте (99,98%Fe), 3 – залізо технічно чисте (99,92% Fe), 4 – пермалой (78% Ni), 5 – нікель, 6 – сплав залізо-нікель (26% Ni)

Магнітну проникність μ_H при $H \approx 0$ називають початковою проникністю і визначають її при дуже слабких полях, порядку 0,1 А/м. Найбільше значення магнітної проникності носить назву максимальної проникності і позначається μ_{\max} . При сильних полях в області насичення магнітна проникність μ прагне до одиниці. Характеристикою феромагнетиків у змінних магнітних полях є динамічна магнітна проникність μ_{\sim} , що являє собою відношення амплітудного значення індукції до амплітудного значення напруженості магнітного поля:

$$\mu_{\sim} = \frac{B_m}{H_m} \quad (9.1)$$

Зі збільшенням частоти змінного поля динамічна магнітна проникність зменшується через інерційність магнітних процесів.

9.2 Магнітом'які матеріали

Магнітом'які матеріали повинні мати високу магнітну проникність, невелику коерцитивну силу і малі втрати на гістерезис. Вони

використовуються для осердя трансформаторів, електромагнітів, у вимірювальних приладах і в ряді інших випадків, де необхідно при найменшій витраті енергії досягти найбільшої індукції. Для зменшення втрат на вихрові струми в трансформаторах використовують магнітно-м'які матеріали з підвищеним питомим електричним опором, застосовуючи осердя, зібрані з окремих ізольованих один від одного тонких листів.

Електротехнічна сталь. Одним із магнітом'яких матеріалів, що має дуже широку область застосування, є спеціальна електротехнічна сталь, легована кремнієм. Вона використовується для роботи в порівняно сильних змінних магнітних полях: силових трансформаторах усіх типів, електричних машинах, дроселях, різних електромагнітних реле, приладах. Випускається електротехнічна сталь, легована кремнієм, в листах і рулонах. Кремній, що вводиться в сталь у кількості 0,8–4,8%, утворює з залізом твердий сплав і різко підвищує питомий електричний опір.

Завдяки підвищенню питомого опору в електротехнічній кремнистій сталі знижуються втрати на вихрові струми. Наявність кремнію позначається сприятливо й на інших магнітних властивостях: знижуються втрати на гістерезис, збільшується магнітна проникність у слабких і середніх полях, знижується магнітострикція.

Кремній вводять у сталь у вигляді феросиліцію, що містить мінімум вуглецю, який є дуже шкідливою домішкою для кремнистої електротехнічної сталі, як і для інших магнітом'яких матеріалів. Кремній є корисною присадкою і з чисто технологічної точки зору: він гарний розкислювач, покращує структуру, зв'язуючи частину розчинених газів і переводячи кисень у міцні, не відновлювані вуглецем окиси, що сприятливо позначається на магнітом'яких властивостях. Домішки кремнію сприяють переходу вуглецю з більш шкідливої форми цементиту у менш шкідливу форму графіту.

Введення в маловуглецеву сталь кремнію збільшує її твердість, межу міцності при розтягуванні, але додає крихкість. У зв'язку з цим електротехнічна кремниста сталь випробується на крихкість. Про крихкість судять за кількістю перегинів, що витримуються пластинкою без зламу. Число перегинів залежить від товщини листів, що складає для різних марок 0,1–1,0 мм.

Позначення марок електротехнічної сталі розшифровуються в такий спосіб: буква Е – електротехнічна сталь; перші цифри 1, 2, 3 і 4 після букви Е – ступінь легування кремнієм, а саме: 1 – слабологована сталь з вмістом кремнію в межах 0,8–1,8% з питомим об'ємним опором $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \times \text{м}$; 2 – середньологована з вмістом кремнію в межах 1,8–2,8% ($0,4 \cdot 10^{-6} \times \text{ Ом} \times \text{м}$); 3 – підвищеноологована сталь з вмістом кремнію в межах 2,8–3,8% ($0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \times \text{м}$); 4 – високоологована сталь з вмістом кремнію 3,8–4,8% ($0,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \times \text{м}$). Другі цифри (від 1 до 8) вказують на найважливіші магнітні властивості: 1 – нормальні питомі втрати; 2 – знижені втрати; 3 – низькі

втрати; літера А – особливо низькі втрати; 4 – гарантовані значення втрат при частоті 400 Гц і магнітної індукції в середніх за силою полях; 5 – гарантоване значення відносної магнітної проникності в слабких магнітних полях; 6 – гарантоване підвищене значення відносної магнітної проникності в слабких магнітних полях; 7 – гарантоване значення відносної магнітної проникності в середніх магнітних полях; 8 – гарантоване підвищене значення відносної магнітної проникності в середніх магнітних полях. Третя цифра 0 означає холоднокатану текстуровану сталь; третя і четверта цифри 00 означають холоднокатану малотекстуровану сталь. Приклади позначення марок: E41, E48A, E3100, E330A.

Розходження гарячекатаної і холоднокатаної сталі полягає в тому, що при гарячому прокатуванні відбувається лише слабка орієнтація зерен сталі в напрямку прокатування, і в силу цього вона має незначну анізотропію. Застосування повторного прокатування листової сталі в холодному стані з наступним випалюванням істотно змінює її кристалічну структуру за рахунок орієнтації ребер зерен уздовж напрямку прокатування, відбувається текстурування сталі. Текстурована сталь відрізняється великою магнітною анізотропією, а її магнітні властивості випі при намагнічуванні в поздовжньому (по ходу прокатування) напрямку.

Холодне прокатування проводиться 2–3 рази з проміжним і залишковим випалюванням, що знижує внутрішні напруження при прокатуванні і відбувається також видалення ряду шкідливих домішок. Щоб уникнути окислювання випалювання проводиться у вакуумі чи в атмосфері водню. Перевагою холоднокатаної сталі є більш висока магнітна індукція і менші втрати при трохи меншому питомому опорі.

Приклад: холоднокатана сталь Э320, товщиною 0,35 мм має такі параметри: $B_{25} = 1,8$ Т, $p_{1/50} = 0,7$ Вт/кг, $r = 0,47 \times 10^{-6}$ Ом \times м, а аналогічна сталь гарячекатана має: $B_{25} = 1,46$ Т, $p_{1/50} = 1,4$ Вт/кг, $r = 0,57 \times 10^{-6}$ Ом \times м. B_{25} означає індукцію при $H = 2500$ А/м, $p_{1/50}$ – питомі втрати при індукції, рівній 1 Т, і частоті 50 Гц.

Застосування листової електротехнічної сталі зменшеної товщини позначається сприятливо на зменшенні втрат на вихрові струми. Сталі, тонші за 0,1 мм, дуже дорогі і нестандартизовані. Застосування їх виправдовується лише при підвищеній частоті, тим більше, що при малих товщинах зі зменшенням товщини збільшуються втрати на гістерезис. У якісної висококремнистої сталі втрати на вихрові струми при частоті 50 Гц і індукції 1,0 Т складають не більш 25–30% загальних втрат. При частоті 400 Гц втрати на гістерезис і вихрові струми в сталях з товщинами 0,35 і 0,075 мм практично рівні, а при 800–1000 Гц більш тонка сталь уже має явні переваги щодо втрат у порівнянні з більш товстою.

У кремнистої електротехнічної сталі різних марок магнітна проникність може змінюватися в досить широких межах. У особливо

високоякісних сталей початкова відносна магнітна проникність досягає значень 6000–8000, а максимальна доходить до 200 000.

У зв'язку з відомим погіршенням магнітних властивостей листової сталі від механічної обробки (різання, штампування) готові деталі рекомендується піддавати термообробці – обпалюванню з захистом від окислювання.

Окалина, що утворюється при обпалюванні травлених після прокатування листів, має порівняно великий питомий опір, достатній для локалізації вихрових струмів у межах одного листа.

Тривале теплове старіння листової електротехнічної сталі викликає деяке збільшення втрат, тому здійснюється перевірка на старіння для різних марок при температурах 120–150°C протягом 170 год. Припустиме збільшення втрат встановлене в межах від 3 до 9% (у залежності від ступеня легування сталі кремнієм).

Тонка електротехнічна сталь холодного прокатування випускається в рулонах. Осердя з неї одержують методом памотування. Велике практичне значення має зниження питомих втрат в електротехнічних сталях для роботи при 50 Гц у силових потужних трансформаторах і в пристроях підвищеної частоти, що досягається як за рахунок рецептурних змін, так і за рахунок зменшення товщини листів і поліпшення технології прокатування.

Прикладом застосування металокерамічних магнітом'яких матеріалів можуть служити магнітні клини для електричних машин, розроблені на основі систем залізо – алюміній і залізо – кремній. У першому випадку залізо міститься в межах 82–88 %, у другому 93,5–96 %. Отримані клини мають досить гарні механічні і магнітні параметри, зокрема питому ударну в'язкість до 2,1 кДж/м².

Пермалої. Це залізнікелеві сплави, які мають досить велику початкову магнітну проникність в області слабких полів і практичну відсутність у них анізотропії та магніострикції. Розрізняють високонікелеві і низьконікелеві пермалої. Високонікелеві пермалої містять 72–80% Ni, низьконікелеві – 40–50% Ni.

Зміна основних магнітних властивостей і питомого опору сплавів залізо–нікель, у залежності від вмісту нікелю, показана на рис. 9.4. Найбільше значення максимальної магнітної проникності має сплав, що містить 78,5% Ni. Дуже легку намагнічуваність пермалоїв у слабких полях пояснюють практичною відсутністю в них анізотропії.

Магнітні властивості пермалоїв дуже чутливі до зовнішніх механічних напруг, залежать від хімічного складу та наявності сторонніх домішок у сплаві; а також дуже різко змінюються від режимів термообробки матеріалу (температури, швидкості нагрівання й охолодження, складу навколишнього середовища тощо). Термічна обробка високонікелевих пермалоїв складніша, ніж низьконікелевих.

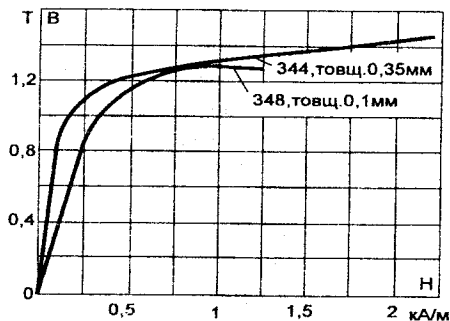


Рисунок 9.4 – Залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля для електротехнічної сталі

Індукція насичення високонікелевих пермалоїв майже в два рази нижча, ніж в електротехнічної сталі, і в півтора рази нижча, ніж у низьконікелевих пермалоїв.

Магнітні проникності високонікелевих пермалоїв у кілька разів вищі, ніж у низьконікелевих, і набагато перевищують проникності електротехнічних сталей. Питомий опір високонікелевих пермалоїв майже в три рази менший, ніж низьконікелевих, тому при підвищених частотах переважно використовують низьконікелеві пермалої. Крім того, магнітна проникність пермалоїв сильно знижується зі збільшенням частоти, і тим різкіше, чим більше її початкове значення. Це пов'язано з виникненням у матеріалі помітних вихрових струмів через невеликий питомий опір. Вартість пермалоїв визначається вмістом у їхньому складі нікелю.

Різновиди пермалоїв. Сплави залізонікелеві з високою магнітною проникністю випускаються декількох груп, кожна з яких містить ще ряд марок. У марках пермалоїв буква Н означає нікель, К – кобальт, М – марганець, Х – хром, С – кремній, Д – мідь. Додаткова буква У означає сплав з поліпшеними властивостями, П – із прямокутною петлею гістерезиса. Цифра в марці вказує процентний вміст нікелю. Крім найбільш освоєних у промисловому виробництві марок пермалоїв, інтерес викликає сплав, що одержав назву супермалої з дуже високими магнітними властивостями в слабких полях.

Застосування пермалоїв. Сплави 45Н и 50Н застосовують для виготовлення осердь малогабаритних силових трансформаторів, дроселів, реле і деталей магнітних кіл, що працюють при підвищених індукціях без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням. Зі сплаву 50НХС виготовляють осердя імпульсних трансформаторів і апаратури зв'язку звукових і високих частот. Сплави 79НМ, 80НХС, 76НХД використовують для виготовлення осердь малогабаритних трансформаторів, реле і магнітних екранів при товщині 0,02 мм, осердя імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів і безконтактних реле. Тонкі

стрічки з пермалоїв різних марок використовують як матеріал для комірок пам'яті в пристроях лічильно-обчислювальної техніки.

Альсифери – сплави заліза з кремнієм і алюмінієм. Оптимальний склад альсифера: 9,5% Si, 5,6% Al, інше Fe. Такий сплав відрізняється твердістю і крихкістю, але може бути виготовлений у виді фасонних виливків. Основні властивості альсиферів: $\mu_n = 35500$, $\mu_{\max} = 120000$, $H_c = 1,8$ А/м, $p = 0,8$ мкОм·м, тобто, не поступаються властивостям високонікелевих пермалоїв. Вироби з альсифера: магнітні екрани, корпуси приладів, які виготовляються методами лиття з товщиною стінок не менше 2–3 мм через крихкість сплаву. Ця особливість обмежує застосування даного матеріалу. Завдяки крихкості альсифер можна розмелювати в порошок і використовувати поряд з карбонільним залізом для виготовлення високочастотних пресованих осердь.

9.3 Магнітотверді матеріали

За складом, станом і способом одержання магнітотверді матеріали підрозділяються на: леговані сталі, що гартуються на мартенсит, литі магнітно-тверді сплави, магніти з порошків, магнітно-тверді ферити, пластично деформовані сплави і магнітні стрічки.

Характеристиками матеріалів для постійних магнітів служать коерцитивна сила, залишкова індукція та максимальна енергія, що віддається магнітом у зовнішній простір. Магнітна проникність матеріалів для постійних магнітів нижча, ніж магнітом'яких матеріалів, причому чим вища коерцитивна сила, тим менша магнітна проникність.

Магніт у замкнутому стані (у виді тороїда) не віддає енергію в зовнішній простір. Для віддачі магнітної енергії необхідно мати повітряний простір між полюсами, тобто, повинен бути розімкнений магнітний ланцюг.

На рис. 9.5 наведена крива розмагнічування (частина граничної петлі гістерезису в II квадранті – ділянка B_r-H_c), а також крива B_r-0 , залежність енергії W_1 від індукції B_1 .

Енергія в повітряному зазорі залежить від довжини зазору, причому індукція B_1 в проміжку буде менша залишкової B_r індукції внаслідок розмагнічувальної дії полів магніту. Енергія в одиниці об'єму повітряного зазору може бути виражена такою рівністю:

$$W_1 = B_1 H_1 / 2, \quad (9.2)$$

де H_1 – напруженість поля, що відповідає індукції B_1 .

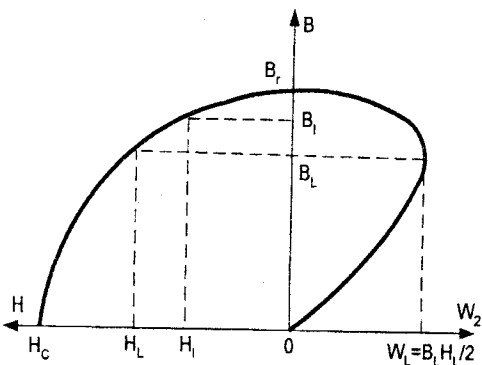


Рисунок 9.5 – Криві розмагнічування і магнітної енергії

Чим менша довжина магніту і відносно більший зазор, тим більше розмагнічувальне поле полюсів і менше B_1 . При замкнутому магніті $B_1 = B_r$, причому енергія дорівнює нулеві, тому що $H_1 = 0$. Якщо зазор між полюсами дуже великий, то енергія за цих умов також прямує до нуля, тому що $B_1 = 0$, $H_1 = H_c$. При деяких значеннях B_1 і H_1 енергія досягає максимальної величини:

$$W_1 = \frac{B_L H_L}{2} = \frac{(BH)_{\text{макс}}}{2} = W_{\text{макс}} \quad (9.3)$$

Значення (9.3) визначає найкраще використання магнітів і тим самим є найбільш важливою характеристикою якості матеріалів для постійних магнітів. Нерідко для характеристики таких матеріалів використовують добуток $B_L H_L$ або коефіцієнт опуклості кривої розмагнічування матеріалу:

$$\gamma = \frac{(BH)_{\text{макс}}}{2B_r H_c} \quad (9.4)$$

Постійні магніти мають найширше застосування. Вони різноманітні за конструкцією та габаритами.

Магнітотверді матеріали поділяють на: ковкі і які обробляються різанням; матеріали, що не піддаються кванню, а переробляються у виробі методом фасонного лиття і не обробляються різанням, а тільки шліфувачням; матеріали, що перероблюються у виробі з порошків шляхом пресування чи зв'язування або металокерамічним способом. Технологічність їх залежить від хімічного складу і структури матеріалу та

впливає на магнітні властивості, зокрема на коерцитивну силу, яка вважається визначальним параметром.

Ковкі матеріали, що обробляються механічно. Основними ковкими матеріалами, що піддаються загартуванню, є сталі: вуглецева, хромиста, вольфрамова і кобальтова. Вуглецева сталь має найбільш низькі магнітні параметри і не має великого значення як магнітотвердий матеріал. Хромисті, вольфрамові і кобальтові сталі для постійних магнітів випускають різних розмірів і перерізів: круглого, квадратного та прямокутного. Магнітні властивості в межах встановлених вимог гарантуються лише за умови дотримання термічної обробки й старіння в повній відповідності з затвердженими технологічними інструкціями. Магнітні властивості хромистих сталей з підвищеним вмістом хрому (до 3%) при дуже складній термообробці можна довести до властивостей більш дорогої вольфрамової сталі, завдяки чому в ряді випадків стала можливою заміна останньої. Вольфрамова сталь відрізняється великою стійкістю проти магнітного старіння. З усіх стандартних марок легованих сталей для постійних магнітів кобальтова сталь має найбільш високі магнітні властивості. Питома максимальна енергія в неї доходить до 4000 Дж/м^3 . Коерцитивна сила кобальтових сталей підвищується зі збільшенням вмісту кобальту. Застосування кобальтової сталі стримується дефіцитністю і високою вартістю кобальту. Кобальтова сталь відрізняється підвищеною твердістю (число Бринелля 270–340). Для механічної обробки деталей з кобальтової сталі застосовують відпуск чи випал для пом'якшення.

Знаходить застосування також ковкий залізо-кобальто-молібденовий сплав з вмістом молібдену 13–15%, відомий під назвою ремалой чи комоль. Цей сплав майже не містить вуглецю. Він має більшу коерцитивну силу, ніж кобальтова сталь і більш опуклу криву розмагнічування, завдяки чому максимальна питома магнітна енергія в нього доходить до 5000 Дж/м^3 . Ремалой має велику стійкість проти старіння до температур близько $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Широке застосування його стримує висока вартість.

Особливу групу магнітотвердих матеріалів складають сплави, здатні до холодного прокатування та волочіння. До їхнього числа відносять сплави міді, нікелю і заліза (куніфе), міді, нікелю, кобальту (куніко), заліза, кобальту і ванадію (вікелой). Сплави куніфе і куніко мають велику коерцитивну силу – $24000\text{--}56000 \text{ А/м}$, залишкову індукцію $0,6\text{--}0,25 \text{ Т}$ і максимальну питому енергію від 2500 до 4500 Дж/м^3 . Сплави типу вікелой можуть бути отримані з питомою енергією ще більш високою, ніж у сплавів куніфе і куніко, а саме: від 4000 до 14000 Дж/м^3 . Ці сплави придатні до холодного прокатування і волочіння. Залізомарганцевий сплав з малими присадками титана або алюмінію має коерцитивну силу $6400\text{--}16000 \text{ А/м}$, залишкову індукцію $0,5\text{--}0,1 \text{ Т}$, максимальну енергією $2000\text{--}25000 \text{ Дж/м}^3$. Для цих сплавів потрібно електролітичний марганець високого ступеня чистоти.

У деяких приладах застосовують магнітні сплави заліза з платиною чи кобальту з платиною. Сплав кобальт–платина має дуже високу коерцитивну силу – до 320000 А/м з максимальною питомою енергією, що доходить до 23000 Дж/м³.

Нековкі сплави, що механічно погано обробляються. Велику групу магнітотвердих матеріалів складають сплави, що, внаслідок високої твердості та крупнокристалічної структури, погано піддаються механічній обробці. Деталі з них одержують методом лиття або методом порошкової металургії. Основними компонентами цих матеріалів є залізо, алюміній у позначеннях сплаву позначається буквою Ю, нікель – Н, мідь – Д, кобальт – К, титан – Т.

Деякі сплави, що містять кобальт, піддають термомагнітній обробці, тобто впливу сильною постійного магнітного поля при охолодженні магнітів після виливання. Це приводить до підвищення магнітних властивостей. Литі сплави мають достатню стійкість до старіння.

Сплави залізо–нікель–алюміній і особливо залізо–нікель–алюміній–кобальт відрізняються порівняно високою вартістю. Механічній обробці піддаються тільки деталі простої форми зі сплавів, що не містять кобальту. Крім того, деталі можна шліфувати. Для грубого шліфування застосовують електроіскрову обробку. Перед механічною обробкою проводять випал для зменшення твердості і крихкості.

Залізо–нікель–алюмінієві сплави, як і залізо–нікель–алюмінієво–мідні і залізо–нікель–алюмінієво–кобальтові, використовуються для одержання деталей металокерамічним способом. Цей спосіб особливо вигідний для виготовлення дрібних деталей масою від часток грама до 30 г. Застосування металокерамічної технології вирішило задачу виробництва дрібних деталей зі сплавів, що містять кобальт. Металокерамічна технологія забезпечує при виробництві деталей з цих сплавів менше відходів внаслідок відсутності ливарних дефектів, більшої механічної міцності, однорідності. При тиску спікання в чистому водні 400–800 МПа при 1300 °С металокерамічні магніти з залізо–нікель–алюмінієвого сплаву мають щільність на 8%–7% меншу, ніж литі, при рівних магнітних властивостях. Існують два способи одержання магнітів за металокерамічною технологією. У першому випадку деталі з суміші чистих порошків пресуються в прес-формах у два прийоми: спочатку при пониженому тиску і температурі, а потім при повному тиску з наступним остаточним спіканням; остаточною операцією є термічна чи термомагнітна обробка. Другий спосіб полягає у виготовленні металокерамічних заготовок, з яких після термообробки і прокатування на смуги та листи штамнують деталі, що піддаються остаточному спіканню. Другий спосіб більш продуктивний і надає виробу більшої щільності.

9.4 Матеріали спеціального призначення

Це особлива група матеріалів, які мають особливі магнітні властивості, що визначаються структурою та складом. До таких матеріалів належать нижченаведені:

Сплави, що відрізняються незначною зміною магнітної проникливості при зміні напруженості поля. Основним є пермінвар, який являє собою потрійний сплав Fe-Ni-Co з вмістом цих компонентів 25,45 і 30% відповідно. Сплав піддають випалюванню при 1000 °С, після чого витримують при температурі 400–500 °С та повільно охолоджують. Він має невелику коерцитивну силу, початкова магнітна проникливість 300, що зберігається сталою при 250 А/м, індукції 0,1Т; недостатньо стабільний, чутливий до впливу температури та механічних напружень.

Ізоперм. В його склад входять залізо, нікель, алюміній або мідь. Магнітна проникливість 30-80, яка мало змінюється до напруженості в декілька сотень ампер на метр.

Термомагнітні сплави. Це сплави на основі Ni-Cr, Fe-Ni або Fe-Ni-Cr. Вказані сплави використовуються для компенсації температурної похибки в установках, що викликано зміною індукції постійних магнітів або зміною опору проводів в магнітоелектричних приладах у порівнянні з тим значенням, при якому проводилось градування. Для отримання температурної залежності магнітного проникнення використовується властивість феромагнетиків понижувати індукцію при збільшенні температури поблизу точки Кюрі. Для цих феромагнетиків точка Кюрі знаходиться поміж 0 і 100 °С в залежності від домішок легувальних елементів. Сплав Ni-Cu при вмісті 30% Cu може компенсувати похибки для меж температур від -20 до +80 °С, а при 40% Cu – від -50 до +10 °С. Найбільше технічне застосування отримали сплави Fe-Ni-Co (компенсатори). Перевагами їх є повна відновлюваність властивостей в діапазоні зміни температури від -70 до +70 °С, висока відтворюваність характеристик зразків і добра механічна оброблюваність.

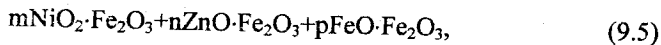
Сплави з високою магнітострикцією. Це сплави системи Fe-Pt, Fe-Co, Fe-Al. Значення $\Delta l/l$ для сплавів вказаних систем тривалі і лежать в межах $40-120 \times 10^{-6}$. Як магнітострикційні матеріали використовується також чистий нікель, який має властивість великої від'ємної магнітострикції, нікелекобальтові сплави, деякі марки пермалоїв та різні ферити. Явище магнітострикції використовується в генераторах звукових та ультразвукових коливань.

Залізокобальтові сплави. Вони мають особливо високу індукцію насичення, до 2,4 Т, тобто більшу, ніж у всіх відомих феромагнетиків. Питомий електричний опір таких сплавів невеликий. Сплави, які мають вміст Co від 50% до 70%, називають **пермендюрами** і можуть використовуватись, внаслідок їх високої вартості, лише в спеціальній апаратурі, а саме: в динамічних репродукторах, осцилографах, телефонних

мембранах тощо.

Ферити являють собою магнітну кераміку з незначною електронною електропровідністю. Великий питомий опір, що перевищує ρ заліза в 10^6 – 10^{11} разів, і відносно невеликі втрати енергії в області підвищених і високих частот забезпечують феритам широке застосування. Ферити являють собою системи з окислів заліза й окислів двовалентних, рідше – одновалентних металів, що відповідають загальній формулі $MeO \cdot Fe_2O_3$, де Me – символ двовалентного металу. Ферити мають кубічні кристалічні ґратки, подібні до ґраток шпінелі, що зустрічається в природі: $MgO \cdot Al_2O_3$. Більшість сполук зазначеного типу, як і природний магнітний залізняк (магнетит) $FeO \cdot Fe_2O_3$, мають магнітні властивості, але сполуки $ZnO \cdot Fe_2O_3$ і $CdO \cdot Fe_2O_3$ є немагнітними. Наявність або відсутність магнітних властивостей визначається кристалічною структурою цих матеріалів і, зокрема, розташуванням іонів двовалентних металів і заліза між іонами кисню. У випадку структури звичайної шпінелі, коли в центрі кисневих тетраєдрів розташовані іони Zn^{++} або Cd^{++} , магнітні властивості відсутні. При структурі оберненої шпінелі, коли в центрі кисневих тетраєдрів розташовані іони Fe^{++} , матеріал має магнітні властивості.

Ферити, що мають магнітні властивості та знайшли технічне застосування, являють собою, як правило, тверді розчини декількох найпростіших сполук, у тому числі і немагнітних. Так, наприклад, загальна формула широкорозповсюджених нікель-цинкових феритів має такий вигляд:



де коефіцієнти m , n , p визначають кількісні співвідношення між компонентами.

Процентний склад компонентів відіграє істотну роль в одержанні тих або інших магнітних властивостей матеріалу. Ферити, які використовують в техніці, називають **оксиферами**, вони являють собою складні оксидні феромагнетики. Технологія виготовлення феритів має досить істотний вплив на властивості готових виробів. Технологічний процес виробництва феритових виробів зводиться до того, що попередньо одержують феритовий порошок, що складається з тонко подрібнених, ретельно перемішаних і обпалених окислів відповідних металів. До нього додають пластифікатор – розчин полівінілового спирту – і з отриманої маси пресують під великим тиском вироби необхідної форми. Далі піддають випаленню при температурі 1100–1400 °С. При цьому відбувається спікання й утворення твердих феритів. Усадка феритів при випалюванні може досягати 20%. Ферити – тверді і крихкі матеріали, що не дозволяють проводити обробку різанням і допускають тільки шліфування і полірування.

Магнітом'які ферити. Ферити з великим значенням μ мають і велике

значення втрат, що швидко ростуть зі збільшенням частоти. На рис. 9.6 наведені залежності початкової магнітної проникності від температури для марганець-цинкових і нікель-цинкових феритів.

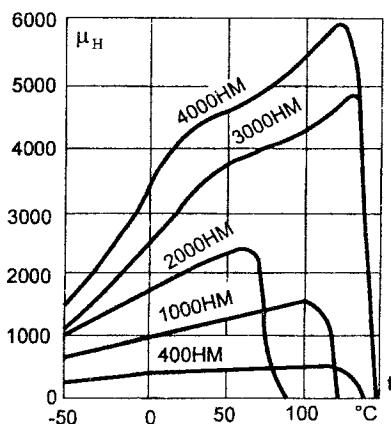


Рисунок 9.6 – Залежності початкової магнітної проникності від температури для марганець-цинкових і нікель-цинкових феритів

Як видно з кривих, μ_n підвищується з ростом температури до точки Кюрі, а потім різко падає. При цьому чим вище значення початкової проникності, тим нижче буде розташовуватись точка Кюрі в межах цього різновиду феритів. Основні фізичні характеристики феритів такі: густина 3–5 Мг/м³, питома теплоємність близько 0,7 кДж/(кг·К), теплопровідність приблизно 5 Вт/(м·К), температурний коефіцієнт лінійного розширення порядку 10⁻⁵ К⁻¹, питомий опір 10⁻¹–10⁻⁸ Ом·м.

Ферити мають відносно велику діелектричну проникність, що залежить від частоти і складу феритів. З підвищенням частоти діелектрична проникність феритів падає. Тангенс кута втрат феритів – від 0,005 до 0,1. У феритах спостерігається явище магнітострикції. В різних феритах цей ефект виявляється по-різному. Феритам з низькою температурою Кюрі властивий менший магнітострикційний ефект.

В даний час знаходять основне застосування такі групи змішаних феритів: марганець-цинкові, цинкові і літій-цинкові. Гранична частота для різних марок феритів знаходиться в межах від 0,2 до 20 МГц.

Ферити з прямокутною петлею гістерезиса. Для запам'ятовувальних пристроїв обчислювальної техніки особливо цікавим є ферити, що мають прямокутну форму петлі гістерезиса. До матеріалів і виробів цього типу є ряд специфічних вимог. Основним з таких параметрів є коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису K_H , що є відношенням залишкової індукції B_r до максимальної індукції $B_{\text{макс}}$:

$$K_{II} = B_r / B_{\max}$$

(9.6)

Магнітотверді ферити. До магнітно-твердих феритів належать барієвий, кобальтовий і деякі інші. Найбільш відомий барієвий ферит $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (фероксидор). На відміну від магнітом'яких феритів він має не кубічні, а гексагональні кристалічні ґратки з одноосьовою анізотропією. В даний час промисловість випускає два види барієвих магнітів: марки БІ (барієві ізотропні) і марки БА (барієві анізотропні). Технологія виробництва БІ подібна до технології виробництва магнітом'яких феритів, у технологічному процесі виробництва БА операція пресування виконується в магнітному полі напруженістю 650–800 кА/м. В табл. 9.1 наведені основні електромагнітні властивості барієвих магнітів. Як видно з цієї таблиці, магніти з фериту барію мають коерцитивну силу до 240 кА/м, що перевищує коерцитивну силу магнітів системи альні (87 кА/м), однак за залишковою індукцією та накопиченою магнітною енергією вони поступаються цим сплавам.

Таблиця 9.1 – Електромагнітні властивості барієвих магнітів

Марка фериту	B_r , Т	H_c , кА/м	W_{\max} , кДж/м ³	ρ , Ом·м
0.7БІ	0,18–0,21	114–128	2,8–3,2	106
1БІ	0,19–0,22	128–144	3,2–4,4	103
2БА	0,3–0,35	184–232	8,0–12,6	103
2БА1	0,28–0,33	192–240	7,2–10	103
3БА	0,35–0,4	128–184	12–14	103

Барієві магніти доцільно виготовляти у вигляді шайб і тонких дисків, вони відрізняються високою стабільністю щодо впливу зовнішніх магнітних полів і не бояться тряски та ударів. Густина барієвого фериту 4,4–4,9 Мг/м³, тобто приблизно в 1,5 раза менше щільності литих залізо-нікель-алюмінієвих сплавів (7,25 Мг/м³), магніти виходять легкими. Питомий опір барієвого фериту в мільйони разів вищий питомого опору литих металевих магнітно-твердих сплавів. Магніти з барієвого фериту можна використовувати при високих частотах. До недоліків барієвих магнітів варто віднести низьку механічну міцність, велику крихкість, сильну залежність магнітних властивостей від температури ($\alpha_b \approx 0,2\% \text{ K}^{-1}$), тобто на порядок вищу, ніж у литих магнітів. Крім того, вони змінюють магнітні властивості після охолодження від кімнатної до низьких температур (–60 °С) і нагрівання до початкової температури.

Магнітодіелектрики являють собою один з різновидів магнітних матеріалів і призначені для використання при високих та підвищених частотах. Вони характеризуються великим питомим електричним опором і

малим тангенсом кута магнітних втрат. Магнітодіелектрики отримують шляхом пресування порошкоподібного феромагнетиту з ізолювальним зерном один від одного органічною чи неорганічною зв'язкою. За основу використовують карбонільне залізо, розмолочений альсифер та ін. Ізолювальною зв'язкою служать фенолформальдегідні смоли, полістирол, скло тощо. Від основи вимагається наявність високих магнітних властивостей, а від зв'язки – здатність утворювати поміж зерен суцільну, без розриву електроізолювальну плівку. Така плівка повинна бути, по можливості, однакової товщини й повинна міцно зв'язувати зерна між собою. Магнітодіелектрики характеризуються ефективною магнітною проникливістю, яка завжди менша, ніж у феромагнетика. Магнітна проникність магнітодіелектриків практично некерована зовнішнім магнітним полем. В зв'язку з широким випуском феритів різних марок, які мають ряд переваг у порівнянні з магнітодіелектриками, останні втратили своє технічне значення та зберегли обмежені сфери застосування.

Конструкційні чавуни і сталі. Ці матеріали застосовуються в електромашинобудуванні, апаратобудуванні, приладобудуванні і повинні відрізнятися високими механічними властивостями і досить широкими технологічними можливостями. Стосовно ж магнітних властивостей їх можна розділити на магнітні матеріали і немагнітні. До перших можуть бути віднесені сірий чавун, вуглецеві і леговані сталі, до других – немагнітні сталі і немагнітний чавун.

Сірий чавун. Містить 3,2–3,5% вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору, сірки. Межа міцності при вигині сірого чавуна складає 200–450 МПа. Сірий чавун застосовується для виливання корпусів електричних машин, кріпильних деталей. Чавунні виливки, особливо великих розмірів, не вимагають подальшої термічної обробки, однак у деяких випадках випал виробу є корисним.

Вуглецева сталь. Для виливків звичайно використовують вуглецеву сталь з вмістом вуглецю від 0,08 до 0,2%, піддаючи виготовлені з неї виробу повільному випалюванню при 850–900 °С. Для особливо відповідальних і спеціальних електричних машин, а також для машин з полегшеною конструкцією потрібна сталь з підвищеними механічними властивостями – легована нікелем, ванадієм, хромом, молібденом. Вироби з легової сталі після загартування для зняття напруг піддаються відпуску при 650–700 °С. Межа міцності при вигині легованих сталей від 500 до 950 МПа.

Немагнітний чавун. Використовується в тих випадках, коли наявність магнітних властивостей у конструкційному матеріалі може зашкодити роботі приладу або апарата. Широко застосовуваним немагнітним матеріалом є чавун. Він містить у своєму складі нікель і марганець, які забезпечують аустенітну структуру. Склад такого чавуну: 2,6–3,0% С; 2,5% Si; 5,6% Mn; 9–12% Ni; все інше Fe. Магнітна проникність немагнітного чавуна зазначеного складу $\mu = 1,03$; питомий опір $\rho = 1,4$ мкОм·м. Межа

міцності при вигині 250-350 МПа. Немагнітні чавуни легко обробляються різцем. При нагріванні до 400 °С вони зберігають свої парамагнітні властивості. Великий електричний опір немагнітного чавуну дає йому перевагу перед кольоровими сплавами щодо зниження втрат на вихрові струми. Немагнітний чавун використовують при виготовленні кришок, кожухів, втулок масляних вимикачів, об'єм силових трансформаторів та інші.

Немагнітні сталі. Виготовляють шляхом введення до складу сталі нікелю і марганцю, що сприяють зниженню температури переходу, γ -заліза в α -залізо до 20 °С і нижче. Межа міцності при вигині для такої сталі 700–800 МПа, магнітна проникність $\mu = 1,05\text{--}1,2$. Немагнітна сталь через її високі механічні властивості може застосовуватися для виготовлення ряду деталей, що раніше виконувалися зі сплавів міді й алюмінієвих сплавом, які не мали досить високі механічні властивості.

9.5 Контрольні питання

1. Основні властивості та класифікація магнітних матеріалів.
2. Що розуміють під магнітними доменами ?
3. Розкрийте зміст явища феромагнетизму.
4. Схеми орієнтації спінів у доменах при намагнічуванні феромагнетиків.
5. Поясніть особливості спрямування спінових магнітних моментів у феромагнетиків в феромагнетиків.
6. Магнітом'які матеріали.
7. Магнітні матеріали спеціалізованого призначення. Спеціальні феромагнетики, ферити, магнітодіелектрики.
8. Магнітотверді матеріали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корицкий Ю. В. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. Т. 1 / Корицкий Ю. В. ; под ред. Ю. В. Корицкого и др. – [3-е изд., перераб.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 368 с. : ил.

2. Богородицкий Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев – Изд. [7-е, перераб. и доп.] Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1985. – 304 с.

3. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.

4. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы : [учебник для студентов вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики»] / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. шк., 1986. – 352 с. : ил.

5. Колесов С. Н. Электротехнические и конструкционные материалы : [учебник для студ. электротехн. и электромех. спец. транспортных и других вузов] / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – К. : Транспорт Украины, 2003. – 376 с. : рис.

6. Пасынков В. В. Материалы электронной техники / Пасынков В. В. – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.

7. Панченко В. І. Матеріали методичного забезпечення лабораторних робіт з дисципліни “Електротехнічні матеріали” / В. І. Панченко, А. С. Головченко, А. М. Гребенюк. – Дніпр. : Дніпр. НГУ, 2012. – 40 с.

8. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство : [підруч.] / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К. : Грамота, 2006. – 312 с. : іл.

9. Колесов С. Н. Электроматериаловедение (Электротехнические материалы) : [учебник для студ. электротехн. и электромех. спец. вузов] / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Днепропетровск. : Лира ЛТД, 2007. – 476 с. : рис., табл.

СЛОВНИК НАЙВЖИВАНІШИХ ТЕРМІНІВ

- Температурний коефіцієнт лінійного розширення – temperature coefficient of linear expansion;
- питома провідність – specific conductivity;
- питома поверхнева провідність – the specific surface conductivity;
- теплопровідність – thermal conductivity;
- кут діелектричних втрат – the angle of dielectric losses;
- діелектрична проникність – permittivity;
- динамічна в'язкість – dynamic viscosity;
- довжина вільного пробігу частинки, довжина електромагнітної хвилі – mean free path of the particles, the length of electromagnetic waves;
- дипольний момент молекули, магнітна проникність, коефіцієнт ослаблення випромінювання – dipole moment of the molecule permeability, attenuation of radiation;
- молярна концентрація, кінематична в'язкість, коефіцієнт пружного зв'язку – molar concentration, kinematic viscosity coefficient of elastic communication;
- щільність, питомий (об'ємний) опір – density, specific (bulk) resistance;
- питомий поверхневий опір – specific surface resistance;
- питомий тепловий опір – specific thermal resistance;
- поверхнева щільність заряду, механічна міцність – the surface charge density, mechanical strength;
- відносна вологість повітря, кут – humidity, angle;
- вологість матеріалу – dry material;
- кутова частота – angular frequency;
- магнітна індукція – magnetic induction;
- ємність конденсатора, теплоємність – capacitance, heat;
- швидкість світла, питома теплоємність – speed of light, the specific heat;
- електрична індукція – electric induction;
- напруженість електричного поля, модуль пружності – electric field strength, modulus of elasticity;
- електрична міцність – dielectric strength;
- заряд електрона – electron charge;
- сила – force;
- частота – frequency;
- постійна Планка – Planck's constant;
- сила струму – current intensity;
- миттєвий струм – instantaneous current;
- щільність струму – current density;
- постійна Больцмана – Boltzmann constant;
- молекулярна маса, момент сили – molecular mass, moment of force;

число Авогадро, концентрація домішок – Avogadro's number, the concentration of impurities;
показник заломлення – refractive index;
число частинок в одиниці об'єму, концентрація носіїв – number of particles per unit volume, the carrier concentration;
потужність – power;
тиск, питомі втрати потужності – pressure, specific loss of power;
концентрація дірок – concentration of holes;
заряд конденсатора, добротність – charge the capacitor, Q;
абсолютна температура, твердість – absolute temperature, hardness;
температурний коефіцієнт діелектричної проникності – dialektrychnoyi temperature coefficient of permeability;
температурний коефіцієнт питомого опору – temperature coefficient of resistance;
різниця потенціалів – potential difference;
рухливість носіїв – carrier mobility;
енергія – energy;
енергія активації, ширина забороненої зони – activation energy, the band gap;
повний опір змінного струму – AC impedance.

Навчальне видання

**Леонтєв Василь Олександрович
Бевз Світлана Володимирівна
Видмиш Володимир Андрійович**

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено В. Видмишем

Підписано до друку 03.12.2013 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 7,8.
Наклад 75 прим. Зам. № 2013-156.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, К. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.